

JAERI - M
93-107

核融合実験炉トリチウムプラント設計（I）
炉建家トリチウム安全系

1993年5月

吉田 浩・成瀬日出夫・大川 慶直
胤森 望*・堀切 仁*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

核融合実験炉トリチウムプラント設計（I）
炉建家トリチウム安全系

日本原子力研究所那珂研究所 I T E R 開発室

吉田 浩・成瀬日出夫・大川 慶直

胤森 望*・堀切 仁*

(1993年4月1日受理)

本設計検討は、核融合実験炉の I T E R (C D A) / F E R のトリチウムプラント概念設計の一環として実施したものである。検討対象建家としては、建家レイアウトが比較的明らかになっている F E R の炉建家を用いた。この報告書の主な内容は次のとおりである。

- (i) 外部放射線及びトリチウムによる放射線業務従事者と一般公衆の被曝防護に関する関連法令の比較、検討
- (ii) 再処理施設及びPWRにおけるゾーン区分の調査
- (iii) 原子力施設における建家気密度の調査
- (iv) 核融合実験炉建家におけるゾーン区分（管理区域、非管理区域）
- (v) 雾囲気トリチウム浄化設備（通常時用、分解修理時用、事故時用）及び通常換気設備の系統設計、機器設計、配置設計
- (vi) 雾囲気トリチウム浄化設備からのトリチウム廃液発生量と廃液濃度及び排気トリチウム濃度と年間排出量の検討
- (vii) 大量トリチウム放出事故時の所要換気風量と運転時間の検討
- (viii) 炉建家設計における課題の摘出

Design Study of Fusion Experimental Reactor Tritium Plant(I)
Tritium Safety Systems for Reactor Building

Hiroshi YOSHIDA, Hideo NARUSE, Yoshinao OHKAWA
Nozomu TANEMORI * and Hitoshi HORIKIRI *

Department of ITER Project
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 1, 1993)

A preliminary design study of tritium safety systems for the fusion experimental reactor building has been carried out as part of the tritium plant design for the ITER(CDA)/FER. FER building was used as the reference reactor building in the present study, because its general layout has rather been clarified.

The major items described in this report are as follows;

- (i) Review of the Japanese regulations related to tritium safety for the protection of worker's and public radiation,
- (ii) Review of the facility zoning in the Japanese commercial plants for spent fuel reprocessing, PWR, etc.,
- (iii) Review of air-leak tightness of the Japanese nuclear facilities,
- (iv) Zoning of fusion reactor building (controlled and uncontrolled areas),
- (v) Design of room air detritiation systems for normal operation, in-vessel component maintenance, and accidental large tritium spills,
- (vi) Amount of tritiated waste water, solid waste and environmental tritium exhaust from room air detritiation systems,
- (vii) Required ventilation flow rate and operation time period at a large tritium spill,

* Sinryo Corporation

(viii) Requirements for the reactor building design

Keywords: ITER, FER, Safety Regulation, Worker's and Public Radiation,
Fuel Reprocessing Plant, PWR, Tritium Plant, Reactor Building
Zoning, Tritium Safety System, Room Air Detritiation System

目 次

1.はじめに	1
2.放射線防護に関する法規制値	4
2.1 主要法規	4
2.2 関連法規の比較	4
2.3 トリチウムを対象とした場合の規制値	9
3.核融合実験炉建家におけるゾーン区分の検討	21
3.1 ゾーン区分に関する IAEA の定義例	21
3.2 商用再処理施設におけるゾーン区分	21
3.3 実用発電用原子炉におけるゾーン区分	22
3.4 核融合実験炉建家におけるゾーン区分	23
3.5 核融合実験炉建家のゾーン区分に関する問題点	25
4.トリチウム安全系の基本設計条件	32
4.1 敷地境界の規制値	32
4.2 トリチウムの放出管理目標値	32
4.3 トリチウム閉じ込め条件	32
4.4 各室の気密条件	32
4.5 トリチウム放出事故	33
4.6 火災に対する考慮	33
4.7 地震に対する考慮	34
5.トリチウム安全系設計	38
5.1 全体設計	38
5.2 換気空調設備 (HVAC系)	39
5.3 霧囲気トリチウム浄化設備 (TCS系)	41
5.4 設備レイアウト	44
5.5 ユーティリティ諸元	45
6.補足検討	86
6.1 事故時用 TCS の所要換気風量と運転時間	86
6.2 霧囲気トリチウム浄化設備からのトリチウム廃液発生量	87
6.3 TCS 廃液中のトリチウム濃度	89
6.4 HVAC系及びTCS系からの排気トリチウム濃度	89
6.5 HVAC系及びTCS系からの放射性固体廃棄物の発生量	90
6.6 一次冷却水漏洩の低減化の必要性	91

6.7 触媒酸化塔及び乾燥塔の設計計算法	92
7. まとめ	109
参考文献	111

Contents

1.	Introduction	1
2.	Japanese Regulations for Radiation Protection	4
2.1	Review of Major Regulations	4
2.2	Comparison of Related Regulations	4
2.3	Limitations for Exposure and Environmental Release of Tritium .	9
3.	Study for Zoning of Fusion Experimental Reactor Building	21
3.1	IAEA Definition for Nuclear Facility Zoning	21
3.2	Zoning at Japanese Commercial Fuel Reprocessing Plant	21
3.3	Zoning at Japanese Commercial Nuclear Power Plant	22
3.4	Zoning of Fusion Experimental Reactor Building	23
3.5	Problems for Zoning of Fusion Experimental Reactor Building ..	25
4.	Basic Design Conditions of Tritium Safety Systems for Fusion Experimental Reactor Building	32
4.1	Regulatory Limits at Site Boundary	32
4.2	Target Limit of Environmental Tritium Release	32
4.3	Multiple Barrier Confinement Philosophy	32
4.4	Air Leak Tightness for Controlled Areas in Reactor Building ..	32
4.5	An Example of Accidental Large Tritium Spill	33
4.6	Considerations for Fire Protection	33
4.7	Considerations for Seismic Design	34
5.	Design of Reactor Building Tritium Safety Systems	38
5.1	General System Configuration	38
5.2	Ordinary Room Air Ventilation Systems (HVAC)	39
5.3	Room Air Detritiation Systems (TCS)	41
5.4	Layout in Reactor Building	44
5.5	Utilities	45
6.	Additional Studies	86
6.1	Required Flow Rate and Operation Time of TCS at Accidental Large Tritium Spill in Reactor Hall	86
6.2	Amount of Tritiated Waste Water Generated from TCS	87
6.3	Tritium Concentration in Tritiated Waste Water from TCS	89
6.4	Tritium Concentration in HVAC and TCS Effluent Gas	89
6.5	Amount of Contaminated Solid Waste Generated from HVAC and TCS	90
6.6	Requirement for Reduction of Primary Cooling Water Leakage ...	91

6.7 Design Method of Catalytic Tritium Oxidizer and Dryer for Large TCS	92
7. Summary	109
References	111

1. はじめに

核融合実験炉の炉建家トリチウム安全系に着目した本設計検討は、ITER(CDA)における我が国の貢献として実施した核融合実験炉・トリチウムプラント概念設計（燃料循環系設計及び安全性解析、一次冷却水トリチウム低減化設備設計、放射性固体廃棄物保管施設設計）の一部をなすものである。ITER, FER等の核融合実験炉のトリチウムの係わる設備は、以下に示すように多岐にわたる⁽¹⁾。

- (1) 燃料供給設備（ガスパフ設備、アイスペレット入射設備及びこれらの排気設備）
- (2) 炉心排気設備及びフォアポンプ設備
- (3) NBI関連設備（イオン源、ビームダンプ、クライオ排気ポンプ、フォアポンプ等）
- (4) 一次冷却水設備
- (5) クライオスタッフ排気設備、計測系排気設備等
- (6) 炉建家雰囲気トリチウム浄化設備及び通常換気設備
- (7) 燃料ガス精製設備（プラズマ排ガス、NBI クライオ排気ガス、燃料供給設備排気ガス・プロセントガス、ブランケットスイープガス等）
- (8) 水素同位体ガス分離設備 ((7)からのH-D-T混合ガス)
- (9) 燃料貯蔵、計量管理及び混合調整設備
- (10) 一次冷却水トリチウム低減化処理設備
- (11) トリチウム廃ガス処理設備
- (12) トリチウム廃液濃縮減容設備
- (13) 分解修理ホットセル
- (14) 放射性固体廃棄物の除染、保管設備
- (15) 関連建家雰囲気トリチウム浄化設備

以上のうち、(1)～(5)の炉周辺設備室、炉室（クレーンホール）、及び炉内機器分解修理通路を処理対象とする雰囲気トリチウム浄化設備(6)は、核融合実験炉建家のトリチウム安全設備の要をなすものである。すなわち、本設備は実験炉のすべての状況下（通常運転時、炉内機器の分解修理時、及び大量トリチウム放出事故時）^{(2), (3)}において、従事者のトリチウム被曝を防止するとともに環境へのトリチウム放出を可能な限り低減化する役目を持つ。

また、雰囲気トリチウム浄化設備(15)は、(7)～(12)のトリチウム燃料処理設備用の建家、(13)～(14)のホットセル及び固体廃棄物除染・保管用の建家に必要となるトリチウム安全設備である。

本設計検討は炉建家を対象とするものである。設計の手順及び考え方を以下に示す。

- (1) 放射線被曝の防護に係わる法規制等（図1.1）の検討

トリチウムによる放射線業務従事者及び一般公衆の被曝の防止に係わる国内規制法ならびに商用再処理施設、発電用原子炉施設及び大量トリチウム取扱施設におけるゾーン区分（遮蔽区分、

濃度区分、管理区域等)の考え方を調査した。

(2) 管理区域の設定

実験炉建家内のゾーン区分を行ない、管理区域(常時トリチウム漏洩のあるレッド区域、分解修理時にのみトリチウムが発生するアンバー区域)、非管理区域(トリチウム発生の可能性がない設備のグリーン区域、事務室等のホワイト区域)を設定した。本検討では、従事者の被曝がトリチウムの摂取による内部被曝によってのみ起こるものとし、外部放射線被曝は考慮しないものとした。すなわち、本設計における管理区域は、人が常時立ち入ることが可能であり、かつ室内空気中に含まれる放射性物質がトリチウム水のみであるとした場合の管理区域に係わる法規制値(空気中濃度限度の $3/10 = 2.1 \times 10^{-1} \text{Bq}/\text{cm}^3$)を越える恐れのある場所である。なお、トリチウム及び外部放射線による被曝の複合については、今後の遮蔽設計により炉建家内各室の空間線量率が明らかになった時点で考慮するものとした。

(3) 部屋の気密度設定

国内原子力施設における建家気密構造と空気漏洩率の調査を行ない、管理区域内の部屋の気密度を次のように定めた。

ステンレスライニングを施す部屋 : 10vol%/d

ステンレスライニングを施さない部屋 : 200vol%/d

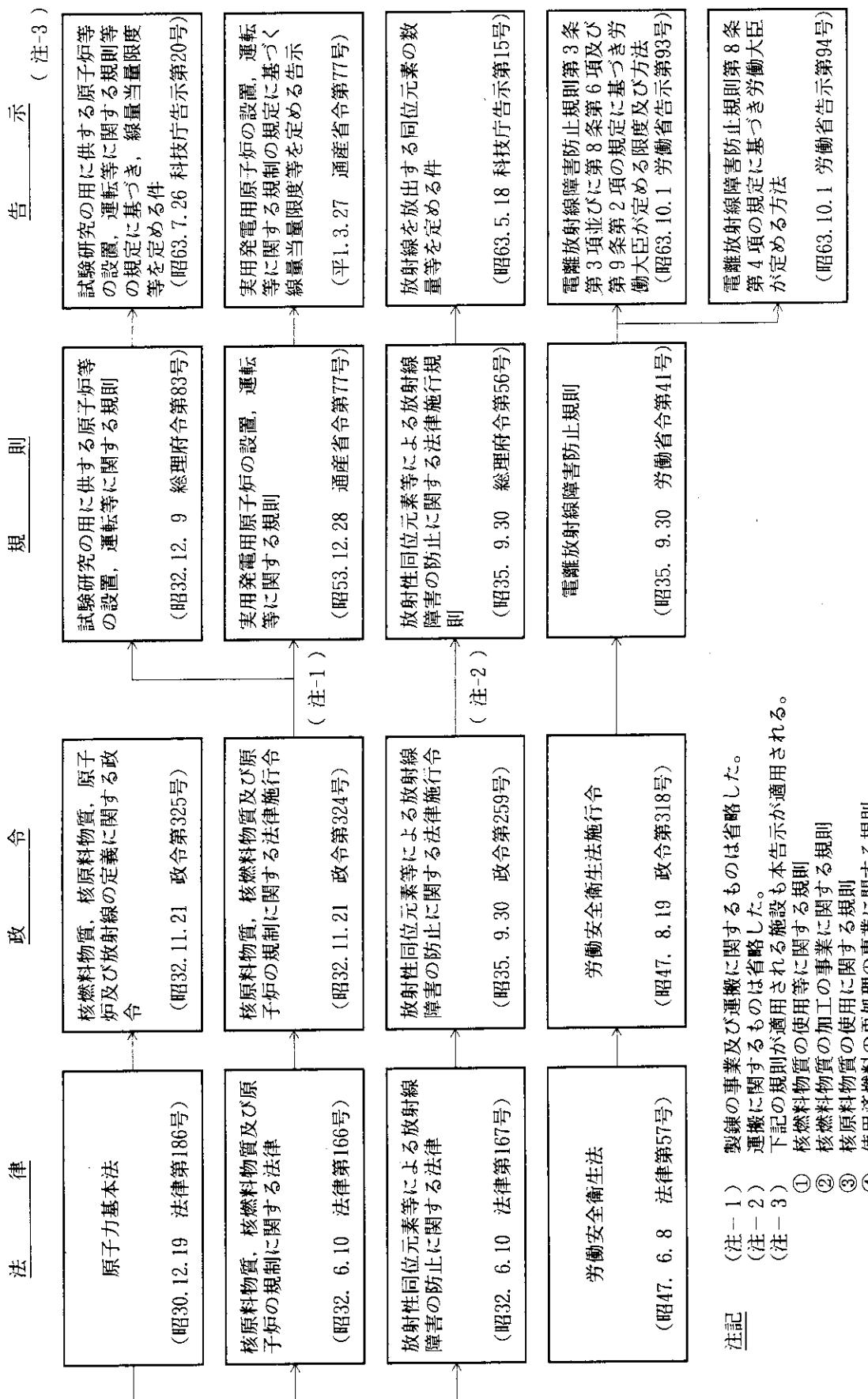
(4) 実験炉建家レイアウト

本検討では、炉周辺設備、分解修理通路、一次冷却水設備等の主要設備の概略レイアウトが検討されているF E R建家を参考基準とした。

(5) トリチウム漏洩率

炉周辺設備のトリチウム漏洩率は、機器・計器類、配管系の設計・製作条件及び操作条件(トリチウムの温度、圧力等)に依存する。本検討では、原研東海研究所のJ R R - 2における排気中のトリチウム放出管理目標値(260Ci/年)を目安とし、トリチウムの常時漏洩の可能性がある設備を一律に0.6Ci/dのトリチウム発生があると仮定した。分解修理時の漏洩量についても0.6Ci/dとした。(6) 雰囲気トリチウム浄化設備の設計

炉周辺設備室、炉室(クレーンホール)、及び炉内機器分解修理通路を処理対象とする雰囲気トリチウム浄化設備(通常運転時用、分解修理時用及び大量トリチウム放出事故時用の3種類)、及び通常換気空調設備について系統構成、機器設計、配置設計を行なった。さらに、スタックからのトリチウム放出量、雰囲気トリチウム浄化設備からのトリチウム廃液及び放射性固体廃棄物の発生量を算定した。トリチウム廃液については、必要となるトリチウム廃液濃縮減容設備の概略設計規模を示した。大量トリチウム放出事故象については、T₂ガス22g($2.2 \times 10^5 \text{Ci}$)が放出された場合の雰囲気トリチウム浄化設備の所要換気風量と運転時間、及びスタックからのトリチウム放出量を検討した。



- 注記
- (注-1) 製錬の事業及び運搬に関するものは省略した。
 - (注-2) 運搬に関するものは省略した。
 - (注-3) 下記の規則が適用される施設も本告示が適用される。
 - ① 核燃料物質の使用等に関する規則
 - ② 核燃料物質の加工の事業に関する規則
 - ③ 核原料物質の使用に関する規則
 - ④ 使用済燃料の再処理の事業に関する規則
 - ⑤ 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則
 - ⑥ 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄物埋設の事業に関する規則

図1.1 放射線障害の防止に関する主要法令

2. 放射線防護に関する法規制値

2.1 主要法規⁽⁴⁾

放射線障害の防止に関連する我が国的主要な法律体系(図1.1)より、核融合実験炉に適用の可能性があると考えられる関連法規として次の3つに着目し、次節において定義や考え方及び規制値の相違を比較検討する。

- (i) 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則及び昭和63年科学技術庁告示15号(以後、障害防止法と略す)
- (ii) 試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則及び昭和63年科学技術庁告示20号(以後、炉規制法と略す)
- (iii) 電離放射線障害防止規則及び昭和63度労働省告示93、94号(以後、電離則と略す)

2.2 関連法規の比較

ここでは、障害防止法、炉規制法及び電離則に記載されている「線量当量限度」、「表面密度限度」、「空気中濃度限度」及び「線量当量の算定法」について比較検討する。

2.2.1 線量当量限度

(1) 放射線業務従事者

表2.1に示すように放射線業務従事者の線量当量限度は、3法規で同一の値を採用している。表中、緊急時の実効線量当量限度の例外規定については、それぞれの法規で記述が異なるので注意が必要である。

(2) 一般公衆

一般公衆に対する線量当量限度は、表2.2に示すように3法規の間で相違がある。すなわち、障害防止法の線量当量限度(1cm線量当量: 250 μSv/3月)は、事業所の境界で定義される外部放射線による被曝限度値である。炉規制法の線量当量限度(実効線量当量限度)は、周辺監視区域外における外部放射線被曝と内部被曝とを合計した限度値(実効線量当量限度: 1 mSv/年)である。ただし、障害防止法においても表2.2の脚注1に述べるように、外部被曝及び内部被曝の恐れが同時にある場合(被曝の複合)の線量当量限度と濃度限度(空気中、排水中の放射性同位元素)が規定されている。

被曝が複合する場合の規制値は次の式で与えられる。

$$\frac{x}{250} + \frac{y}{\text{排気中又は空気中の濃度限度}} = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 x は事業所の境界における 3 月間についての 1cm 線量当量 (μSv)、 y は事業所の境界の外の空気中の放射性同位元素の濃度の 3 月間についての平均濃度 (Bq/cm^3) である。 x と y の値は、それぞれの分母に示される規制値以下であるとともに上式を満足しなければならない。この時の x と y の値が複合を考慮したときの法規制値である。

なお、障害防止法の線量当量限度値 (1cm 線量当量 : $250\mu\text{Sv}/3\text{月}$) は、評価期間を 1 年とすると炉規制法の実効線量当量限度 ($1\text{mSv}/\text{年}$) と等価になる。

2.2.2 管理区域に係わる線量当量等

管理区域における外部放射線に係わる線量当量、放射性同位元素の空気中濃度及び表面汚染密度、複合被曝に関する 3 法規の記述を表 2.3 に示す。また、各法規における管理区域の定義を 2.2.5 節に添付する。

(1) 人が常時立ちに入る場所の線量当量限度

管理区域において人が常時立ちに入る場所の線量当量限度を表 2.4 に示す。障害防止法と電離則で同一の限度値となっているが、炉規制法ではとくに記載されていない。

(2) 表面密度限度

管理区域内の表面密度限度は、表 2.5 に示すように 3 法規とも同一の値となっている。しかし、表面密度限度を規定する物の定義は、以下のように各法規で若干違いがある。

(i) 障害防止法

放射性施設内的人が常時立ちに入る場所において、人が触れる物（施行規則 1 条 13 号）

(ii) 炉規制法

管理区域内の人の触れる恐れのある物（科技庁告示 20 号 5 条）

(iii) 電離則

放射性物質取扱作業室内の天井、床、壁、設備等（電離則 29 条）

2.2.3 放射性同位元素の濃度限度

(1) 人が常時立ちに入る場所の空気中濃度限度

人が常時立ちに入る場所の空気中濃度限度は、3 法規とも放射性同位元素の核種及び化学形に応じて定められた値（科技庁告示 15 号、20 号及び労働省告示別表）に基づいているが、表 2.6 に示すように平均濃度の定義はそれぞれ異なる。濃度の平均時間が 8 時間と最も短い障害防止法が、最も厳しい規制値を定めていると考えることもできる。

(2) 排気又は排水に係わる放射性同位元素の濃度限度

障害防止法（科技庁告示 15 号）及び炉規制法（科技庁告示 20 号）では、排気又は排水に係わる放射性同位元素の濃度限度を放射性同位元素の核種及び化学形に応じて定めているが、電離則ではとくに記載はない。表 2.7 に両告示における濃度限度の考え方の相違を示すが、濃度限度は同一の値となっている。

2.2.4 線量当量の算定法

(1) 実効線量当量及び組織線量当量の算定法

表2.8に示すように3法規とも同一の算定法を使用している。

(2) 外部放射線による線量当量の算定法

障害防止法及び電離則では、以下に示すように1MeV未満のエネルギーを有する電子線及びエックス線を含む放射線の種類に応じて計算法が示されているが、炉規制法ではとくに記載されていない。

(イ) 放射線がエックス線又はガンマ線である場合

(科技庁告示15号31条、労働省告示94号2条)

ここで

Hは、1 cm線量当量 (Sv), 3 mm線量当量 (Sv) 及び70 μm線量当量 (Sv) ,

f_X は、自由空間中の空気吸収線量が1グレイ(Gy)である場合の線量当量(Sv)

(表2.9).

Dは自由空間中の空気吸収線量(Gy)である。

(口) 放射線が中性子線である場合（科技庁告示15号31条、労働省告示94号1条）

二二六

は 1 cm^2 線量当量 (Sv)、 3 mm 線量当量 (Sv) 及び $70\mu\text{m}$ 線量当量 (Sv)、

f_n は、自由空間中の粒子フルエンスが1平方センチメートル当たり 10^{12} 個である場合の線量当量 (Sv) (表2.10) ,

Φ は、自由空間中の粒子フルエンス（個/cm²）である。

(八) 放射線が2種類以上ある場合(科技庁告示15号31条、労働省告示94号3条)

放射線が2種類以上ある場合は、放射線の種類毎に計算した線量当量の和とする。

(3) 内部被曝による実効線量当量の算定法

3 法規とも以下に示す計算式を使用している（科技庁告示15号24条、科技庁告示20号11条、労働省告示93号2条）。

(1) 一般式

ここで、

H_{EI} は、内部被曝による実効線量当量 (mSv),

Iは、吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の摂取量 (Bq) ,

(ALI)_sは、各告示の別表に示された年摂取限度 (Bq) である。

(ロ) トリチウム水に適用した場合

吸入摂取したトリチウム水による実効線量当量を体外計測法やバイオアッセイ法によらず計算で求める場合の計算式としては次の式が用いられる。

$$H_{EI} = \frac{50 I}{2.9 \times 10^9} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$I = 1.8 \times 10^6 C \cdot t \cdot F \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここで、

Cは、空気中のトリチウム水濃度 (Bq/cm³) ,

tは、被測定者が作業室その他の放射性同位元素を吸入摂取する恐れのある場合に立ち入った時間 (h) ,

Fは、被測定者が呼吸する空気中の放射性同位元素の濃度の空気中トリチウム水濃度に対する割合である。

なお、炉規制法では(6)式は示されていない。

(4) 内部被曝による組織線量当量限度の算定法

3法規とも以下に示す計算式を用いている（科技庁告示15号24条、科技庁告示20号11条、労働省告示93号2条）。

(イ) 一般式

$$H_{TI} = \frac{500I}{(ALI)_{NS}} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

ここで、

H_{TI} は、内部被曝による組織線量当量,

Iは、吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の摂取量 (Bq) ,

(ALI)_{NS}は、告示別表に示された年摂取限度 (Bq) である。

(ロ) トリチウム水に適用した場合

告示別表ではトリチウム水の年摂取限度が規定されていないので、トリチウム水の内部被曝による組織線量当量の算定は行なわれるのが普通である。

(5) 実効線量当量の算定法

3法規とも次の計算式を用いている（科技庁告示15号25条、科技庁告示20号11条、労働省告示93号3条）。

$$\text{実効線量当量(mSv)} = 1000H + H_{EI} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここで、

Hは、外部放射線による 1 cm 線量当量 (Sv) ,

H_{EI} は、内部被曝による実効線量当量(mSv)である。

(6) 組織線量当量

3 法規とも以下に示す計算式を用いている（科技庁告示15号25条、科技庁告示20号11条、労働省告示93号3条）。

(イ) 皮膚

表2.8に示した70 μ m線量当量で評価する。

(口) 眼の水晶体

表2.8に示した3mm当線量当量評価する。

(八) 上記以外の組織

$$\text{組織線量当量} (\text{mSv}) = 1000H + H_{\text{TL}} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

ここで

Hは、外部放射線による 1 cm 線量当量 (Sv) ,

H_{T1} は、内部被曝による実効線量当量(mSv)である。

2.2.5 主要法令における「管理区域」の定義

(1) 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則

第一章（用語の定義）の第一条より、

「管理区域は、外部放射線に係わる線量当量が科学技術庁長官（以下「長官」という。）が定める線量当量を越え、空気中の放射性同位元素の濃度が長官が定める濃度を越え、又は放射性同位元素によって汚染される物の表面の放射性同位元素の密度が長官が定める密度を越える恐れのある場所をいう。」

(2) 試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則

第一条の二（定義）より、

「管理区域」とは、炉室、使用済燃料の貯蔵施設、放射性廃棄物の廃棄施設等の場所であつて、その場所における外部放射線に係わる線量当量が科学技術庁長官（以下「長官」という。）の定める線量当量を越え、空気中の放射性物質（空気又は水のうちに自然に含まれている放射性物質を除く。以下同じ。）の濃度が長官の定める濃度を越え、又は放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度が長官の定める密度を越える恐れのあるものをいう。

(3) 重離放射線障害防止規則

第二章第三条（管理区域の明示等）より。

放射線業務を行なう事業の事業者は、外部放射線による実効線量当量と空気中の放射性物質による実効線量当量との合計が一週間につき0.3ミリシーベルトを越える恐れのある区域（以下

「管理区域」という。) を標識によって明示しなければならない。

なお、ここに規定する空気中の放射性物質による実効線量当量の算定は、0.3 ミリシーベルトに一週間の労働時間中における空気中の放射性物質の濃度の平均(一週間における労働時間が48時間を越え、又は48時間に満たないときは、一週間の労働時間中における空気中の放射性物質の濃度の平均に当該労働時間を48時間で除して得た値を乗じて得た値。すなわち、「週平均濃度」)の労働大臣が定める限度の十分の三に対する割合を乗じて行なうものとする。

2.3 トリチウムを対象とした場合の規制値

本節では、核融合実験炉施設の被曝環境を想定する。ただし、空気中の放射性同位元素はトリチウムとし、またトリチウムの化学形はトリチウム水とし、人体に対する危険度合がトリチウム水の約5万分の1である T_2 、DT、HT等のトリチウムガスは無視するものとする。すなわち、法規上の「放射性同位元素の種類が明らかで、かつ1種類である場合」として取り扱う。また、エックス線、ガンマ線、中性子線等の外部放射線(1 MeV未満のエネルギーを有する電子線及びエックス線を含む)による被曝の複合を考慮する。すなわち、外部放射線により被曝する恐れがありしかも空気中のトリチウム水を吸入摂取する恐れのある場合を想定する。

2.3.1 線量当量限度

(1) 放射線業務従事者

表2.1と同じである。

(2) 一般公衆

事業所の境界における一般公衆の線量当量限度を表2.11に示す。トリチウム水の摂取による内部被曝と外部放射線による被曝の複合の場合については、以下の式で算定する。

$$\frac{x}{250} + \frac{y}{5 \times 10^{-3}} = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

ここで、xは事業所の境界における3月間についての1cm当量線量(μSv)、yは事業所の境界の外の空気中のトリチウム水濃度の3月間についての平均濃度(Bq/cm^3)である。式中の値 5×10^{-3} は、科技庁告示15号別表第1に定められた規制値である。したがって、xとyの値はそれぞれの分母の値以下であるとともに上式を満足しなければならない。この時のそれぞれの値が、複合を考慮した場合の法規制値となる。

2.3.2 空気中濃度限度

(1) 人が常時立ち入る場所の空気中濃度限度

トリチウム水のみを考えるとき(放射性同位元素の種類が明らかで、かつ1種類である場合)の空気中濃度限度を表2.12に示す。

2.3.3 管理区域に係わる線量当量等

表2.13は、管理区域における被曝線量当量、空気中濃度、表面密度及び被曝の複合に対する規制値を示したものである。トリチウム水の場合については、次の式により規制値を算定できる。

$$\frac{x}{300} + \frac{y}{2.1 \times 10^{-1}} = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

ここで、xは1週間についての1cm線量当量(μSv)、yは1週間についての空気中のトリチウム水の平均濃度(Bq/cm^3)であり、それぞれ分母の値以下であるとともに上式を満足しなければならない。

(1) 管理区域で人が常時立ち入る場所の線量当量限度

空気中のトリチウム水の摂取による内部被曝と外部放射線による被曝の恐れがある複合の場合については、次式で算定される規制値を満足しなければならない。

$$\frac{x}{1} + \frac{y}{7 \times 10^{-1}} = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

ここで、xとyはそれぞれ人が常時立ち入る場所における1週間についての1cm線量当量(mSv)及びトリチウム水の8時間についての平均濃度(Bq/cm^3)である。xとyは、それぞれの分母に示される規制値(xについては1mSv/週、yについては表2.12に示す濃度限度 $7 \times 10^{-1} \text{Bq}/\text{cm}^3$)以下の値及び上式を満たす値でなければならない。

(2) 管理区域における表面密度限度

トリチウムはアルファ線を放出しない核種であるので、表2.5に示した値が規制値となる。

2.3.4 排気又は排水に係わる濃度限度

事業所の境界の外の空気中ならびに事業所の境界における排水中の放射性同位元素がトリチウム水のみである場合の濃度限度を表2.14に示す。外部放射線による被曝の恐れがあり、かつトリチウム水を経口摂取する恐れがある場合(被曝の複合)には、次式で算定される値が規制値となる。

(イ) 事業所の境界の外の空気中のトリチウム水

$$\frac{x}{250} + \frac{y}{5 \times 10^{-3}} = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

ここで、xは事業所の境界における3月間についての1cm線量当量(μSv)、yは事業所の境界の外の空気中のトリチウム水濃度(3月間についての平均濃度)(Bq/cm^3)である。

yとxの値は、それぞれの分母に示される規制値以下であるとともに、上式を満足するところが必要である。このときのxとyの値は、複合を考慮する場合の法規制値となる。

(口) 事業所の境界における排水中のトリチウム水

$$\frac{x}{250} + \frac{y}{6 \times 10^1} = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

ここで、 x は事業所の境界における 3 月間についての 1 cm 線量当量 (μSv)、 y は事業所の境界における排水中のトリチウム水濃度 (3 月間についての平均濃度) (Bq/cm^3) である。

y と x の値は、それぞれの分母に示される規制値以下であるとともに、上式を満足するところが必要である。このときの x と y の値は、複合を考慮する場合の法規制値となる。

表2.1 放射線業務従事者の線量当量限度

項目	規制値 ^{*1}	法令
実効線量当量限度	50mSv/年	科告15号5条 科告20号6条 電離則4条
緊急時の実効線量当量限度	100mSv/回	科告15号27条 科告20号8条 電離則7条1項
組織線量当量限度	眼の水晶体	150mSv/年
	眼の水晶体以外	500mSv/年
	女子の腹部	13mSv/3月
	妊娠中の女子の腹部	10mSv/妊娠期間中

* 1 1年： 4月1日を始期とする1年間

表2.2 一般公衆に対する線量当量限度

	記述	備考
障害防止法 (科告15号10条)	事業所の境界における線量当量限度 ： 1cm線量当量について $250\mu\text{Sv}/3\text{月}$	外部放射線について の限度値 内部被ばくとの 複合 ^{*1} が必要
炉規制法 (科告20号3条)	周辺監視区域外の線量当量限度 実効線量当量： 1mSv/年 組織線量当量： 皮膚； 50mSv/年 眼の水晶体； 50mSv/年	実効線量当量は、 外部被ばくと内部 被ばくとが合計さ れる
電離則	(記述なし)	—

* 1 同時に外部放射線に被ばくする恐れがあり、又は空気中の放射性同位元素を吸入摂取若しくは水中の放射性同位元素を経口摂取する恐れがあるときは、それぞれの線量当量限度又は、濃度限度に対する割合の和が1都なるようなその線量当量または空气中若しくは水中の濃度をもって、その線量当量限度又は濃度限度とする（科告15号30条）。

表2.3 管理区域に係わる線量当量等

法令	外部放射線に係わる線量当量	空気中の放射性同位元素の濃度(空気中濃度)	放射性同位元素により汚染される物の表面の放射性同位元素の密度(表面密度)	外部放射線に被ばくする恐れがあり、かつ空気中の放射性同位元素を吸入摂取する恐れがあるとき (複合) * 1
障害防止法 (科告15号 4条)	1cm線量当量が 300μSv/週 を越える恐れ がある場所	1週間についての平均濃度が 濃度限度の 3/10を 越える恐れがある 場所 * 4	表面密度限度 の1/10を 越える恐れが ある場所	1cm線量当量の左記外部放射線に係わる線量当量に対する割合と空気中の放射性同位元素の濃度の左記空気中濃度に対する割合の和が1となるような1cm線量当量及び空気中の放射性同位元素の濃度を越える恐れがある場所
炉規制法 (科告20号 2条)	同上	同上	同上	同上
電離則	記載なし	* 2	同上 (電離則32条)	外部放射線による実効線量当量と空気中の放射性物質による実効線量当量(*3)との合計が、1週間につき0.3mSvを越える恐れのある区域 (電離則3条)

* 1 $(x / 300) + (y / \text{空気中濃度限度の } 3/10) = 1$

x : 1週間についての1cm線量当量(μSv)

y : 1週間についての空気中の平均濃度(Bq/cm³)

上式を満たすx、yの値を越える場所が管理区域となる。

* 2 関連する記述として、電離則25条で、

放射性物質取扱作業室を除く事業所内の週平均濃度(原子炉の運転の業務を行なうときにあっては、3月間にについて日平均濃度の平均)を空気中濃度限度の3/10以下にしなければならない。

* 3 空気中の放射性物質による実効線量当量は、下式で算定する(電離則3条)。

(実効線量当量) = 0.3 mSv x [(1週間の労働時間中における空気中の濃度の平均/空気中濃度限度の3/10) x (1週間における労働時間/48)]

* 4 トリチウム水に適用した場合:(7 x 10⁻¹Bq/cm³)(3/10) = 2.1 x 10⁻¹Bq/cm³

参考: 1MPC_a (体組織) = 1.85 x 10⁻¹Bq/cm³ : 40時間/週

1MPC_a (全身) = 2.96 x 10⁻¹Bq/cm³ : 40時間/週

表2.4 人が常時立ち入る場所の線量当量限度

法令	記述	備考
障害防止法 (科告15号10条)	1 cm線量当量について 1 mSv/週	内部被ばくとの複合が必要(科告15号30条)
炉規制法	記載なし	—
電離則 (電離則16条)	1 cm線量当量について 1 mSv/週	内部被ばくとの複合について記載なし

表2.5 表面密度限度

法令	項目	規制値	備考
障害防止法 (科告15号8条)	管理区域内の表面密度限度	アルファ線を放出する放射性同位元素	4 Bq/cm ²
		アルファ線を放出しない放射性同位元素	40 Bq/cm ²
炉規制法 (科告20号5条)	管理区域から持ち出す物の表面密度限度	アルファ線を放出する放射性同位元素	0.4 Bq/cm ²
		アルファ線を放出しない放射性同位元素	4 Bq/cm ²
電離則(29条)		法規制値は管理区域内の表面密度限度の1/10	—
		同上	—
障害防止法 (科告15号16条)		アルファ線を放出する放射性同位元素	0.4 Bq/cm ²
		アルファ線を放出しない放射性同位元素	4 Bq/cm ²
炉規則(7条)		—	—
電離則(32条)		—	—

表2.6 空気中濃度限度についての相違点

法令	場所	平均濃度	外部放射線 との複合	備考
障害防止法 (科告15号7条)	人が常時立ち入る 場所における空気中の 放射性同位元素の濃度	8時間について の平均濃度	必要(科告 15号30条)	空気中濃度 限度値は 告示別表 に示されて いるが、 3法規とも 同一値。
炉規制法 (科告20号7条)	放射線業務従事者の 呼吸する空気中の 放射性物質の濃度	3月間について の平均濃度	必要	
電離則 (電離則24条、 労告93号)	放射性物質取扱 作業室内の空気中の 放射性物質の濃度	1日の労働時間 中における濃度 の平均(*1) (日平均濃度)	記載なし	

* 1 日平均濃度 = (空気中濃度の平均) \times {1日の労働時間 (h) / 8 h}

表2.7 実効線量当量、組織線量当量の算定法

項目	算定法	法令
実効線量当量	1 cm線量当量	科告15号25条 科告20号11条 労告93号3条
眼の水晶体の 組織線量当量	3 mm線量当量	
皮膚の 組織線量当量	70 μ m線量当量	
皮膚及び眼の水晶体 以外の組織の 組織線量当量	1 cm線量当量	
内部 被ばく	実効線量当量 (A)式	科告15号24条 科告20号11条 労告93号2条
組織線量当量	(B)式	

(A)式 : $(50\text{mSv}) \times \{\text{攝取量}/(\text{ALI})_s\}$

$(\text{ALI})_s$: 確率的影響に対する限度から求められた年攝取限度

(B)式 : $(500\text{mSv}) \times \{\text{攝取量}/(\text{ALI})_{ns}\}$

$(\text{ALI})_{ns}$: 非確率的影響に対する限度から求められた年攝取限度

表2.8 排気又は排水に係わる放射性同位元素の濃度限度についての相違点

法令		場所	平均濃度	外部放射線 との複合	備考
排気	障害防止法 (科告15号 14条)	排気口における排氣中 又は事業所の境界の外の 空気中の放射性同位元素 の濃度 (*1)	3月間に ついての 平均濃度	必要 (科告15号 30条)	濃度限度は 告示別表に 示されている が、両法規 とも同一値。
	炉規制法 (科告20号 9条)	周辺監視区域の外の 空気中の放射性物質 の濃度	同上	必要	
	電離則	—	—	—	
排水	障害防止法 (科告15号 14条)	排水口における排液中 又は事業所の境界におけ る排水中の放射性同位 元素の濃度 (*2)	3月間に ついての 平均濃度	必要 (科告15号 30条)	濃度限度は 告示別表に 示されている が、両法規 とも同一値。
	炉規制法 (科告20号 9条)	周辺監視区域の外側の 境界における水中の放射 性物質の濃度	同上	必要	
	電離則	—	—	—	

*1 排気監視設備を設けて排氣中の放射性同位元素の濃度を監視する場合

*2 排水監視設備を設けて排水中の放射性同位元素の濃度を監視する場合

表2.9 自由空間中の空気吸収線量が1グレイ
である場合の線量当量
(科告15号 別表第4)
(労告94号 別表第2)

第一欄 エックス 線又はガ ンマ線の エネルギー (MeV)	第二欄 1センチ メートル 線量当量 (Sv)	第三欄 3ミリメ ートル線 量当量 (Sv)	第四欄 70マイク ロメート ル線量当 量 (Sv)
0.010	0.010	0.271	0.930
0.015	0.271	0.686	0.974
0.020	0.601	0.917	1.02
0.030	1.09	1.19	1.19
0.040	1.43	1.42	1.38
0.050	1.63	1.59	1.52
0.060	1.74	1.67	1.58
0.080	1.73	1.66	1.59
0.10	1.65	1.60	1.55
0.15	1.49	1.46	1.42
0.20	1.38	1.36	1.34
0.30	1.31	1.30	1.28
0.40	1.26	1.25	1.24
0.50	1.21	1.22	1.21
0.60	1.19	1.20	1.19
0.80	1.16	1.18	1.18
1.0	1.14	1.16	1.16
1.5	1.13	1.14	1.15
2.0	1.13	1.13	1.14
3.0	1.12	1.13	1.13
4.0	1.11	1.12	1.13
5.0	1.11	1.12	1.12
6.0	1.10	1.11	1.11
8.0	1.09	1.10	1.11
10	1.09	1.11	1.11

備考 該当値がないときは、補間法によって計算する。

表2.10 自由空間中の粒子フルエンスが
1平方センチメートル当たり
 10^{12} 個である場合の線量当量
(科告15号 別表第5)
(労告94号 別表第1)

第一欄 中性子のエネ ルギー (MeV)	第二欄 センチメ ートル線 量当量 (Sv)	第三欄 3ミリメ ートル線 量当量 (Sv)	第四欄 70マイク ロメート ル線量当 量(Sv)
2.5×10^{-8}	8.00	8.80	7.20
1.0×10^{-7}	10.4	8.50	5.50
1.0×10^{-6}	11.2	6.90	3.70
1.0×10^{-5}	9.20	5.30	2.80
1.0×10^{-4}	7.10	4.40	2.50
1.0×10^{-3}	6.20	3.90	2.80
1.0×10^{-2}	8.60	9.20	8.90
2.0×10^{-2}	14.6	18.3	18.2
5.0×10^{-2}	35.0	48.1	46.6
1.0×10^{-1}	69.0	95.0	95.0
2.0×10^{-1}	126	186	168
5.0×10^{-1}	258	266	219
1.0	340	332	292
1.5	362	344	292
2.0	352	335	283
3.0	380	358	305
4.0	409	387	329
5.0	378	358	301
6.0	383	364	302
7.0	403	384	312
8.0	417	407	341
1.0×10^1	446	446	368
1.4×10^1	520	520	359
1.7×10^1	610	610	421
2.0×10^1	650	670	516

備考 該当値がないときは、補間法によって計算する。

表2.11 事業所の境界における線量当量限度

項目	規制値	備考	法令
事業所の境界における線量当量限度	1 cm線量当量について 250 μ Sv／3月	1 cm線量当量は外部被ばくに対する値であり、内部被ばくとの複合が必要	科告15号10条 科告15号30条
事業所の境界における組織線量当量限度	皮膚： 50 mSv／年 眼の水晶体： 50 mSv／年	4月1日を始期とする1年間	科告20号3条

表2.12 人が常時立ち入る場所の空気中濃度限度（トリチウムの場合）(*1)

項目	法規制値	備考
人が常時立ち入る場所における空気中の放射性同位元素の濃度限度	8時間についての平均濃度 $7 \times 10^{-1} \text{Bq}/\text{cm}^3$ (科告15号7条、別表第1)	外部放射線との複合は科告15号30条1項の定めによる(*2)

*1：放射性同位元素の種類が明らかで、かつ1種類である場合。

*2：外部放射線に被曝する恐れがあり、かつ空気中のトリチウム水を吸入摂取する恐れがある場合

$$x/250 + y/5 \times 10^{-3} = 1$$

x：事業所の境界における3月間についての

1 cm線量当量 (μ Sv)

y：事業所の境界の外の空気中のトリチウム水濃度 (Bq/cm^3)

表2.13 管理区域に係わる線量当量等

	外部放射線に 係わる 線量当量	空気中の 放射性同位元素 の濃度 (空気中濃度)	放射性同位元素 によって汚染 される物の表面 の放射性同位 元素の密度 (表面密度)	外部放射線に被ばくする 恐れがあり、かつ空気中 の放射性同位元素を 吸入摂取する恐れが あるとき (複合)
法規制値	1 cm線量当量 が300 μSv /週 を越える場所	1週間について の平均濃度が 空気中濃度限度 の3/10を 越える場所	表面密度限度 の1/10を 越える場所	1 cm線量当量の左記 外部放射線に係わる線量 当量に対する割合と空気 中の放射性同位元素の濃 度に対する割合の和が 1となるような 1 cm線量当量及び空気 中の放射性同位元素の 濃度を越える場所
トリチウム水 に適用した 場合(*1)	同上	$2.1 \times 10^{-1} \text{Bq/cm}^3$ $(7 \times 10^{-1})(3/10)$	同上	空気中濃度限度は表2.12 参照 表面密度限度は表2.5 参照

* 1 次の式を満たすx、yの値を越える場所が管理区域となる。

$$x/300 + y/2.1 \times 10^{-1} = 1$$

x : 1週間についての1 cm線量当量 (μSv)

y : 1週間についての空気中のトリチウム水
の平均濃度 (Bq/cm^3)

表2.14 排気又は排水に係わる放射性同位元素の濃度限度（トリチウム水の場合）*¹

項目	法規制値	備考	法令
事業所の境界の外の空気中の放射性同位元素の濃度	3月間についての平均濃度 $5 \times 10^3 \text{ Bq/cm}^3$	外部放射線との複合は(A)式による	科告15号 14、30条
事業所の境界における排水中の放射性同位元素の濃度	3月間についての平均濃度 $6 \times 10^1 \text{ Bq/cm}^3$	外部放射線との複合は(B)式による	科告20号 9条

* 1：放射性同位元素の種類が明らかで、かつ1種類である場合。

(A)式： 外部放射線に被曝する恐れがあり、かつ空気中のトリチウム水を吸入攝取する恐れがある場合

$$x / 250 + y / 5 \times 10^{-3} = 1$$

x：事業所の境界における3月間についての

1cm線量当量 (μSv)

y：事業所の境界の外の空気中のトリチウム水濃度 (Bq/cm^3)

(B)式： 外部放射線に被曝する恐れがあり、かつ水中の放射性同位元素を経口攝取する恐れがある場合の複合

$$x / 250 + y / 6 \times 10^{-1} = 1$$

x：事業所の境界における3月間についての

1cm線量当量 (μSv)

y：事業所の境界における排水中の

トリチウム水濃度 (Bq/cm^3)

3. 核融合実験炉建家におけるゾーン区分の検討

本章では、再処理施設、発電用原子炉等の商用原子力施設における建家のゾーン区分の現状及び実績を概括し、核融合実験炉建家のゾーン区分の考え方を検討する。

3.1 ゾーン区分に関する IAEA の定義例

(i) ゾーン I (ホワイトゾーン)

この区域では、放射線による被曝や放射性物質による汚染の恐れがなく、当該区域の出入りに制限を設ける必要がない。玄関、事務室、更衣室のクリーン側等がこれに該当する。

(ii) ゾーン II (グリーンゾーン)

この区域では、安全規制のレベルを越える放射線による被曝や放射性物質による汚染の恐れは通常予想されない。当該区域の立入りには、実験用の上衣や靴又は靴カバーの着用等最小限の着替えを必要とする。この区域については、放射線モニタリングを行なうことが望ましい。制御室、操作室、廊下等が該当する。

(iii) ゾーン III (アンバーゾーン)

この区域は、放射性物質の取り扱い作業の性質上被曝や汚染の恐れがゾーン II に比べて高い。当該区域については、放射線及び汚染に対するモニタリングを必要とする。とくに室内空気のモニタリングが重要である。ゾーン II とゾーン IIIとの間の移動については、作業者の着衣の着替えとモニタリングが必要である。

(iv) ゾーン IV (レッドゾーン)

この区域は、密閉空間あるいは格納室（グローブボックス、ホットセル、除染室）であり、放射性物質を直接取り扱う場所である。被曝及び汚染の起こる可能性が高いため、この区域に通常運転中は立ち入ることができない。放射線源を取り除き、除染を行なった後立ち入ることが可能となるが、適切な防護具の着用と滞在時間の制限が必要となる。

3.2 商用再処理施設におけるゾーン区分

(1) 管理区域の区分に関する指針、設計方針

再処理施設については、「再処理施設安全審査指針（昭和61年2月），原子力委員会」⁽⁵⁾において管理区域の区分の設計に関する指針（指針6：放射線被曝管理）が次のように定められている。

「再処理施設の管理区域は、線量当量率、空気中の放射性物質濃度及び表面汚染密度の程度に応じて適切に区分し、適切な出入管理等を行なえる設計であること。」

この指針に適合するための設計方針として、「再処理施設の事業指定申請書」⁽⁸⁾ では以下の記載がなされている。

適切な出入管理等を行なうため、再処理施設の管理区域は、

- (i) 外部放射線にかかる線量当量率の高低、
- (ii) 空気中の放射性物質の濃度又は床等の表面の放射性物質の密度の高低、
- (iii) 空気中又は床等の表面の汚染の発生の可能性の大小

以上を勘案して細区分し、段階的な出入管理等を行なう。

(2) 管理区域内の濃度限度区分

表3.1は、六ヶ所事業所再処理事業指定申請書⁽⁷⁾（添付書類七：使用済燃料等による放射線の被曝管理及び廃棄物の廃棄に関する説明書）における管理区域内の区分基準である。この表に示された各区分の具体的な濃度限度値を表3.2に示す。この表より、汚染区分についても次のように設定することが可能である。

汚染区分1：汚染の可能性のない区域

汚染区分2：管理区域に係わる空気中濃度限度又は管理区域に係わる表面密度限度を越えない区域

汚染区分3：放射線業務従事者に係わる空気中濃度限度又は表面密度限度以下の区域

汚染区分4：放射線業務従事者に係わる空気中濃度限度又は表面密度限度を越える恐れるある区域

(3) 管理区域に係わる遮蔽設計区分

表3.3は、六ヶ所事業所再処理事業指定申請書⁽⁸⁾（添付書類六：再処理施設の安全設計に関する説明書）における管理区域内の区分基準である。表中、区分I2-I4における線量当量率は、立入り時間制限を行なうためいずれも $500\mu\text{Sv}/\text{週}$ に相当する。一方、放射線業務従事者の実効線量当量限度は $50\text{mSv}/\text{年}$ であり、年間50週とすると1週当たり 1mSv となる。従って、区分I4の基準値は、この規制値の1/2に設定したものである。

(4) 再処理施設のゾーン区分のまとめ

表3.4は、外部放射線に係わる遮蔽設計区分及び放射性物質の管理区域内における濃度限度区分（空気中濃度限度及び表面密度限度）とを組み合わせたものである。

3.3 実用発電用原子炉におけるゾーン区分

本節では、実用発電用原子炉におけるゾーン区分に関連する規制、指針等の概要を示す。

(1) 関連法規

軽水炉の管理区域に関しては、「実用発電原子炉の設置、運転等に関する規則」（通産省令第77号の第8条：管理区域への立入制限等）⁽⁴⁾ に以下の記載がある。

管理区域については、次の措置を講ずること。

壁、さく等の区画物によって区画するほか、標識を設けることによって明らかに他の場所と区

別し、かつ、放射線等の危険性の程度に応じて人の立入制限、鍵の管理等の措置を講ずること。

さらに、「管理区域への立入制限等」について、「試験研究の用に供する原子炉等の設置等に関する規則」⁽⁴⁾ 及び「使用済燃料の再処理の事業に関する規則」⁽⁴⁾ においても同じ記述がある。

一方、「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針（昭和52年6月、原子力委員会）」⁽⁹⁾ では、管理区域の区分に関する記述はないが、放射線業務従事者の放射線防護に関して次のように規定している（指針56：放射線防護）。

原子力発電所は、放射線業務従事者の作業性等を考慮して、放射線業務従事者が立入場所において不必要的放射線被曝を受けないように、遮蔽、機器の配置、放射性物質の漏洩防止、換気等所要の放射線防護上の措置を講じた設計であること。

(2) 軽水炉（PWR）におけるゾーン区分

表3.5は、国内の軽水炉（PWR）において実施されているゾーン区分の調査をまとめたものである⁽¹⁰⁾。軽水炉では、前記の使用済燃料再処理施設とは異なり、遮蔽設計区分のみによりゾーン区分を行なっている。なお、表中の線量当量率は遮蔽設計のための目標値であり、放射線業務従事者の被曝管理上は管理区域内の実際の線量当量率に応じて立入時間を制限する必要がある。

(3) 軽水炉（PWR）における換気区分

表3.6は、国内のPWRにおいて採用している換気区分、目標被曝線量及び雰囲気濃度の制限目標を示したものである⁽¹¹⁾。すなわち、PWRではA～Dの区画において放射能放出量を設定するとともに区画毎の作業性を考慮して設定する年間被曝限度の目標値を満足できる雰囲気濃度を維持するように換気風量を設定している。各区画において従事者が作業中に受ける線量当量率（1時間当たりの目標被曝線量）は、1次系の設計漏洩量と放射能レベルを想定して定めた値である。また、各区画の換気風量は目標被曝線量から定まる雰囲気濃度において燃料破損率1%を仮定した場合に必要な風量を設計基準とするものである。実際の燃料破損率はこれより格段に小さいので、実際の被曝線量は表に示した目標値よりもかなり低くなると予想されている。

3.4 核融合実験炉建家におけるゾーン区分

(1) 関連法令、指針等

核融合実験炉に適用される可能性がある主要法令としては、第2章で取り上げたように以下のものが考えられる。

- (i) 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則及び科技庁告示15号,
- (ii) 試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則及び科技庁告示20号,
- (iii) 電離放射線障害防止規則及び労働省告示93、94号

これらの法令では管理区域内外の規制値が規定されているが、管理区域内のゾーン区分についてはとくに定められていない。

一方、核融合炉の安全設計指針の一つとして将来適用の可能性が考えられる「大量トリチウ

ム取扱施設安全審査専門家検討会報告書（科技庁原子力安全局、昭和60年8月）」^(1,2)では、対象施設、ゾーン区分に関して次のように記述している。

I. 適用対象

この指針は、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律に規定する使用施設等であって、大量の非密度トリチウムを取り扱う施設に適用する。

大量の非密封トリチウムを取り扱う施設とは、次の各号のいずれか該当する施設をいう。

- (i) 年間予定使用数量（年間に予定されている使用日ごとの予定使用数量の総計をいう。）が10000 キュリー以上であって1日最大予定使用数量が1000キュリー以上の使用施設、及びこれと構造的に連結されている施設。
- (ii) 貯蔵能力が10000キュリー以上の貯蔵施設及びこれと構造的に連結されている施設。

II. 閉じ込め

指針1：多重隔壁格納の採用

解説：隔壁格納の多密度は設備における取扱量等により異なるが、次のような構成が考えられる。

- 1) 第1次格納系；実験装置、トリチウム貯蔵保管装置等
- 2) 第2次格納系；グローブボックス、セル、フード等
- 3) 第3次格納系；作業室等

指針5：第2次格納系

第1次格納系を収容するグローブボックス、フード、セル等が第2次格納系に相当する。

指針7：第3次格納系

第2次格納系を収容する実験室等が第3次格納系に相当する。

解説：トリチウムの取扱量に応じて、施設の区域分けを行なう。

（例）コールド区域、セミホット区域、ホット区域

(2) 核融合実験炉建家のゾーン区分の考え方

核融合実験炉における放射線作業従事者の被曝防護の観点から問題となる放射性物質及び放射線は、トリチウム、放射化ダスト、空気の放射化ガス、中性子、放射化構造物からのγ線等である。トリチウム（トリチウム水）は経口摂取、皮膚接触による内部被曝が重要であり、その他はすべて外部被曝が問題となる。したがって、核融合実験炉建家のゾーン区分を行なう際の施設設計の基本的な要件は次の2つと考えられる。

- (i) トリチウム、放射化ダスト及び放射化ガスに対しては、室内空気中への放出防止、空気中濃度及び表面汚染密度の低減化のための閉じ込めと換気を行なう。
- (ii) 中性子、放射化構造物からのγ線等に対しては、それぞれに適切な遮蔽を行なう。

(3) 核融合実験炉建家のゾーン区分の私案

ゾーン区分に関する上記の設計条件は、商用再処理施設におけるゾーン区分の設計指針（管理区域設定、管理区域内の濃度限度区分及び遮蔽設計区分）の要求条件と多くの点で類似してい

る。また、トリチウムの閉じ込めについては、大量トリチウム取扱施設安全審査専門家検討会報告書における閉じ込めが適用できる。

以上の考え方に基づいて作成した核融合実験炉建家のゾーン区分の私案を表3.7に示す。これは、再処理施設を遮蔽区分と汚染区分の組み合わせて作成した表3.4を下敷きとし、トリチウム取扱量1 gを目安に設定したものである。

また、表中の遮蔽設計区分の基準線量当量率は以下の根拠により設定した。

- I1：管理区域の外部放射線に係わる線量当量300 $\mu\text{Sv}/\text{週}$ より、週48時間勤務としたときの線量当量6.25 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。
- I2：放射線業務従事者に係わる線量当量限度50 $\text{mSv}/\text{年}$ より、年50週、週48時間勤務としたときの線量当量（20 $\mu\text{Sv}/\text{週}$ ）の1/2。
- I3：放射線業務従事者に係わる線量当量限度50 $\text{mSv}/\text{年}$ より、年50週、週1時間の立入制限を行うときの線量当量（1 mSv/h ）の1/2。
- I4：I3を越える線量当量のとき。

3.5 核融合実験炉建家のゾーン区分に関する問題点

この検討は、既存の法令、規制値、安全審査指針等を適用して核融合実験炉建家のゾーン区分を試みたものである。この結果、次の事項が今後の課題となることが分かった。

(i) 被曝の複合に対する管理

トリチウムは金属及び有機材料を透過し易く、かつ部屋の床、天井、壁及び室内機器の表面に吸着するので、核融合実験炉では空気中のトリチウム濃度管理、表面汚染密度管理が重要となる。実験炉建家のゾーン区分設計ならびに管理区域内の作業時の被曝の防止、低減化を行なう際には、外部放射線被曝とともにトリチウム挙動の特異性を考慮した内部被曝の管理（被曝の複合に対する管理）が不可欠となる。

(ii) トリチウム取扱量とゾーン区分との関係

本検討では、核融合実験炉建家内に設定した管理区域について、「大量トリチウム取扱施設安全審査専門家検討会報告書」に基づくゾーン区分（トリチウム取扱量を基準にした施設の区分）を行なった。しかし、管理区域は、放射線被曝の防護の観点から外部放射線量（線量当量限度）及び汚染の程度（空気中濃度限度、表面密度限度）の双方を考慮して設定されるものである。また、汚染の程度とトリチウム取扱量とは必ずしも一致するものではないことから、核融合炉を対象とするトリチウムの新たな取扱基準が必要であろう。

(iii) 人の立入が困難な区域のゾーン区分

管理区域は、人の立入を前提として被曝の防護の観点から設定されるものである。しかし、核融合実験炉の周辺設備には人の立入が困難と考えられる以下のような区域が存在する。このような場所は核融合炉に独自のものであり、ゾーン区分や作業者の被曝管理の方法については検討を急ぐ必要がある。

(イ) 燃料供給設備室、主排気設備室、N B I 関連設備室等では設備の放射化が予想されるため、機器の修理、交換、点検、運転は遠隔機器で行なうことが計画されている。これらの設備はトリチウムに対する閉じ込め装置（第2次閉じ込め隔壁）となるグローブボックスを設けないので、室そのものを第2次閉じ込め隔壁として設計する必要がある。

(ロ) 炉内機器分解修理操作室

第一壁、ダイバータ、ブランケット（テストモジュール）等の大型の炉内構造物を遠隔機器を用いて行なう部屋であり、作業中の放射線の空間線量率およびトリチウムの空気中濃度が相当に高くなる可能性がある。この区域もトリチウムに対する閉じ込め装置（第2次閉じ込め隔壁）となるグローブボックスがないので、室そのものを第2次閉じ込め隔壁として設計する必要がある。

(ハ) 不活性ガス雰囲気室

中性子による空気の放射化の防止、水素に対する防爆、トーラス真空容器の真空破壊時の空気流入防止等の観点から(イ)の設備室や主排気ダクト区域の雰囲気ガスとしてHeガスやN₂ガスを使用することが検討されている。

表3.1 六ヶ所事業所再処理施設における管理区域内の濃度区分

区分	基準
グリーン区域	外部放射線に係わる線量当量率が $500\mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下であって、通常作業において、空気中の放射性物質の濃度の3月間の平均値又は放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度が、昭和63年科学技術庁告示第20号第2条第1項第2号及び第3号に規定される濃度又は密度を越えない区域。
イエローフィールド区域	外部放射線に係わる線量当量率が $500\mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下であって通常作業において、空気中の放射性物質の濃度の3月間の平均値又は放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度が、昭和63年科学技術庁告示第20号第7条及び第5条に規定される濃度又は密度以下である区域。
レッド区域	外部放射線に係わる線量当量率が $500\mu\text{Sv}/\text{h}$ を越えるか、空気中の放射性物質の濃度の3月間の平均値又は放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度が、昭和63年科学技術庁告示第20号第7条及び第5条に規定される濃度又は密度を越える恐れのある区域で、通常作業時に人の立入りを禁止する区域。

科学技術庁告示第20号：「試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規制等の規定に基づき、線量当量限度等を定める件」

同上第2条： 管理区域に係わる線量当量等

同上第5条： 表面密度限度

同上第7条： 放射業務従事者に係わる濃度限度

表3.2 六ヶ所事業所再処理施設における管理区域区分

	グリーン区域	イエロ区域	レッド区域
外部放射線に係わる線量当量率	$\leq 500\mu\text{Sv}/\text{h}$	$\leq 500\mu\text{Sv}/\text{h}$	$> 500\mu\text{Sv}/\text{h}$
空気中の放射性物質の濃度の3月間の平均値	\leq 空気中濃度限度の $3/10$	\leq 空気中濃度限度	$>$ 空気中濃度限度
放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度	\leq 表面密度限度の $1/10$	\leq 表面密度限度	$>$ 表面密度限度

表3.3 六ヶ所事業所再処理施設における遮蔽設計区分

区分		基準線量当量率
管理区域外	I 1 : 管理区域外	$\leq 6\mu\text{Sv}/\text{h}$
管理区域内	I 2 : 週48時間以内しか立ち入らないところ	$\leq 10\mu\text{Sv}/\text{h}$
	I 3 : 週10時間程度しか立ち入らないところ	$\leq 50\mu\text{Sv}/\text{h}$
	I 4 : 週1時間程度しか立ち入らないところ	$\leq 500\mu\text{Sv}/\text{h}$
	I 5 : 通常は立ち入らないところ	$> 500\mu\text{Sv}/\text{h}$

表3.4 再処理施設のゾーン区分のまとめ

遮蔽設計区分	管理区域外		管理区域内		
	I 1	I 2	I 3	I 4	I 5
汚染区分					
汚染区分1	ホワイト	-	-	-	-
汚染区分2	-	グリーン	グリーン	グリーン	レッド
汚染区分3	-	イエロ	イエロ	イエロ	レッド
汚染区分4	-	レッド	レッド	レッド	レッド

表3.5 軽水炉(PWR)における遮蔽設計区分

区分		線量当量 目標値 ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	根 拠
管理区域外	I	≤ 6.25	管理区域に係わる線量当量限度 ($300 \mu\text{Sv}/\text{週}$) * ¹ より, 週48時間労働として設定。
管理区域内	II	≤ 10	放射線業務従事者に係わる線量 当量限度 ($50 \text{mSv}/\text{年}$)より, 年50週, 週48時間労働とし た場合の線量当量($20 \mu\text{Sv}/\text{h}$) の $1/2$ に設定。
	III	≤ 150	放射線業務従事者に係わる線量当量限度 ($50 \text{mSv}/\text{年}$)より, 年50週とすると $1 \text{mSv}/\text{週}$ となる。 週7時間以内の立入として設定。
	IV	> 150	立入る場合には, 厳重な被曝管理が必要な 区域。

* 1 通産省告示第131号「実用発電用原子炉の設置, 運転等に関する規則
の規定に基づく線量当量限度等を定める告示」による。

表3.6 PWRにおける換気区分と目標被曝線量^{*1}

換気区分	区画内放出放射能量 μCi/s	換気風量 m ³ /min	雰囲気中放射性物質濃度の制限目標	
			雰囲気から受ける目標被曝線量 ^{*2} mrem/h	考え方
A	≤ 0.1	1	0.2 (2μSv/h)	A区分雰囲気から受ける年間被曝線量が年被曝限度 ^{*2} (5 rem/年)の1/10以下となる平均雰囲気濃度とする
B	0.1 < ≤ 1	5	0.4 (4μSv/h)	B区分雰囲気から受ける年間被曝線量が年被曝限度 ^{*2} (5 rem/年)の1/5以下となる平均雰囲気濃度とする
C	1 < ≤ 10	25	0.8 (8μSv/h)	C区分雰囲気から受ける年間被曝線量が年被曝限度 ^{*2} (5 rem/年)の1/2.5以下となる平均雰囲気濃度とする
D	10 < ≤ 100	50	4 (40μSv/h)	D区分雰囲気から受ける年間被曝線量が年被曝限度 ^{*2} (5 rem/年)の2倍以下となる平均雰囲気濃度とする

*1 原子力工業, 1987年2月号(日刊工業新聞社発行)

*2 1 rem = 10 mSv

表3.7 核融合実験炉建家のゾーン区分の私案

遮蔽設計区分 トリチウム 取扱量区分		基準線量当量率($\mu\text{Sv}/\text{h}$)			
		管理区域外		管理区域内	
管理区域外	I 1	I 2	I 3	I 4	
	≤ 6.25	≤ 10	≤ 500	> 500	
管理区域内	C 1	ホワイト	グリーン	アンバー	レッド
	C 2	-	グリーン	アンバー	レッド
	C 3	-	レッド	レッド	レッド

C 1 : トリチウムの取扱量ミリグラムレベル

C 2 : トリチウムの取扱量 1 グラム未満

C 3 : トリチウムの取扱量 1 グラム以上

4. トリチウム安全系の基本設計条件

4.1 敷地境界の規制値

核融合実験炉から放出される放射性気体にはトリチウムの外に種々の放射化ダストや放射化ガスが含まれると考えられるが、本検討ではトリチウム水のみを対象とする。

核融合実験炉の敷地境界における規制値としては、トリチウム水に着目して設定した一般公衆の線量当量限度（表2.11），及び排気又は排水に係わる放射性同位元素の濃度限度（表2.14）を用いる。

4.2 トリチウムの放出管理目標値

核融合実験炉の建設場所を日本原子力研究所那珂研究所の敷地内と想定する。また、実験炉建家から排気を通じて環境に排出されるトリチウムの総量については、東海研究所の原子炉施設における放射性ガスの放出管理目標値（表4.1）⁽¹³⁾を実績のある管理基準値を参考にすることとし、250 Ci/年（JRR-2では約260Ci/年）に設定する。

4.3 トリチウム閉じ込め条件

実験炉建家内のトリチウム閉じ込めについては、3.4節に示した多重隔壁格納の考え方を採用し、次のように定義する。

第1次格納系：炉本体、及び燃料供給設備、主排気設備、NBI設備等の炉周辺設備及び機器。

第2次格納系：上記設備を収容するそれぞれの部屋、セル、フード、グローブボックス、トリチウムが流通する一次配管系を収納する2重配管。トリチウムを内蔵する機器、配管等を収納した真空断熱容器。分解修理操作区域。

第3次格納系：第2次格納系を収容する実験炉建家。炉室（クレーンホール）は、炉真空容器が第2次格納系と考えられるので、第3次格納系に相当する。

4.4 各室の気密条件

ITERの概念設計活動（CDA）では、次のような値が提案された。

- (i) 建家内への漏洩率 1 vol%/d
- (ii) 建家外への漏洩率 0.1 vol%/d

また、ITERでは、炉外及び炉内において想定される種々の冷却材喪失事故の際の建家内圧力

上昇を 0.3気圧程度に抑制するための設計（第一壁ベーキング温度、冷却材の種類・温度・圧力、フィルター／ペント設備）も検討された。

一方、我が国の原子力関連施設の鉄筋コンクリート造り（R C造り）の建家の気密度を表4.2（トリチウム工学実験施設）及び表4.3（軽水炉格納容器、高放射性物質取扱い施設等）に示す⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁷⁾。T P Lの安全設備室及び大実験室では、床、壁及び天井の表面にエポキシ系塗装を行なっているが、これはトリチウムによる汚染の低減化と除染の容易さを考慮したものである。

これらから、R C C V、P C C Vの採用により0.1-0.5vol%/dの気密度は達成可能であること、ステンレスライニングを施したR Cを用いれば2 vol%/d程度となることが分かる。またR Cのみでは100-200vol%/dであるが、壁や天井にエポキシ系塗装をすることにより漏洩率をさらに（1/10程度に）低減することが可能であることも分かる。

核融合実験炉では移動・拡散性の高い放射性物質はトリチウムのみであり、しかも閉じ込め性の高い2重の隔壁（第1次及び第2次隔壁格納）内で取り扱われる。第3次格納隔壁としての役目を持つ核融合実験炉建家では、原子炉格納容器に要求される高い耐圧性は必要ではないと考えられることから、気体状の放射性物質を閉じ込める比較的簡単なコンクリート施行法が採用されると思われる。したがって、本検討ではR Cのみ及びライニング付きR Cを適宜組み合わせる場合の建家気密度を次のように設定する。

- (i) R C造り（ライニングなし）：200vol%/d
- (ii) R C造り（ライニング付き）：10vol%/d

4.5 トリチウム放出事故

I T E Rでは、様々なトリチウム放出事故シナリオが検討、解析されている⁽²⁾。大量のトリチウムが炉建家内に放出される事故シナリオの一例を図4.1に示す（J A E R I - M 85-178参照）。ここで、トリチウム量（22 g）は、クライオ複合ポンプで構成した主排気設備内の全インベントリーである。本設計検討では、トリチウムの放出事故はすべて炉室（クレーンホール）でおこるものと仮定する。さらに、一つのトリチウム放出事故が新たなトリチウム事故事象を同時に引き起こさないとし、最大放出量を22 gと設定する。

4.6 火災に対する考慮

以下の項目について設計上の考慮を払う。

- (i) できる限り不燃性、難燃性の材料を使用し、耐火性を確保する。
- (ii) トリチウム等の水素同位体ガスを取り扱う機器、設備、室は防爆性を確保する。
- (iii) 火災の早期発見、拡大防止、早期消火を図るため、火災検出器、防火壁及び消火設備を適切に配置する。
- (iv) トリチウムガスは通常、活性金属ベッドに一時保管、貯蔵されるので金属火災に対する防

火、消火設備を備える。

4.7 地震に対する考慮

大量の放射性物質を取り扱う核融合実験炉では、地震その他の自然現象に対する設計上の考慮は不可欠である。特に、トリチウム閉じ込め性に係わる機器、設備、建家の耐震設計は、今後の重要な検討課題になると考えられる（本検討では特に取り上げない）。

表4.1 原研東海研究所の原子炉施設における放射性気体廃棄物の放出管理目標値

原子炉施設	気体廃棄物の種類	核種	放出管理目標値
JRR-2	放射性希ガス	^{41}Ar	110TBq/年
	放射性ガス	^3H	9.6TBq/年 (260Ci/年)
JRR-3	放射性希ガス	^{41}Ar	62TBq/年
	放射性ガス	^3H	7.4TBq/年 (200Ci/年)
JRR-4	放射性希ガス	^{41}Ar	960GBq/年
NSRR	放射性希ガス	主に ^{138}Xe 、 ^{41}Ar	44TBq/年
	放射性ヨウ素	^{131}I	4.8GBq/年

[1TBq = 27Ci]

表4.2 原研東海研究所のトリチウム工学実験施設(TPL)における気密度

対象区域、設備	差圧 mmAq	気密度(vol % / h)	
		設計値	実測値
安全設備室 (トリチウム浄化設備室)	-15	1	1
大実験室*1	-15	1	1
グローブボックス*2	-100	0.1	10^{-3} 以下

*1 グローブボックス設置室

室容積： 1400 m³ADS風量： 300 m³/h*2 5ブロック(全容積50 m³)で構成。室容積： 1400 m³ADS風量： 300 m³/h

表4.3 原子力施設における建家気密構造と漏洩率

用途	施設名称	壁材	漏洩率	備考
軽水炉用 原子炉 格納容器	* ¹ 東電 柏崎・刈羽原発	R C C V	0.5vol%/ d 以下	設計圧力 内圧2.85kg/cm ² G 外圧0.14kg/cm ² G 常温, 空気
	* ² 原電 敦賀2号炉	P C C V	0.1W%/ d 以下	設計圧力 最高使用圧力 (圧力の記載なし) 常温, 空気
	* ³ 関電 大飯3, 4号炉	P C C V	0.1W%/ d 以下	設計圧力 0.9×(最高使用圧力) (圧力の記載なし) 常温, 空気
高放射性物質 取扱い施設	* ⁴ 動燃大洗 照射燃料集合体 試験施設 (F M F)	R C ステンレス ライニング	0.1vol%/ h (2.4vol%/ d)	ライニング材 S U S 304 (6mm ^t) 試験セル: N 2ガス 雰囲気 除染セル: 空気雰囲気
	* ⁴ 動燃大洗 照射燃料試験 施設 (A G F)	R C ステンレス ライニング	0.1vol%/ h (2.4vol%/ d)	負圧30mm A q No. 8, 9, 11, 12セル
	* ⁴ 動燃大洗 照射材料試験 施設 (M M F)	R C ステンレス ライニング	0.1vol%/ h 以下 (2.4vol%/ d)	被覆管試験セル
その他	原研H T T R	R C	100vol%/ d	サービスエリア
	動燃もんじゅ	R C	200vol%/ d	

* 1 原子力委員会月報(1977年, vol.22, No8) : 東京電力(株)柏崎・刈羽原子力発電所の原子炉の設置について(答申) P.11

* 2 原子力安全委員会月報(1981年10月号) : 日本原子力発電(株)敦賀発電所の原子炉の設置変更(2号原子炉の増設)について(答申) P.15

* 3 原子力安全委員会月報(1987年1月号) : 関西電力(株)大飯発電所の原子炉の設置変更(3, 4号炉の増設)について(答申) P.14

* 4 日本原子力学会「高放射性物質取扱い施設とロボット」P.221, 243, 265

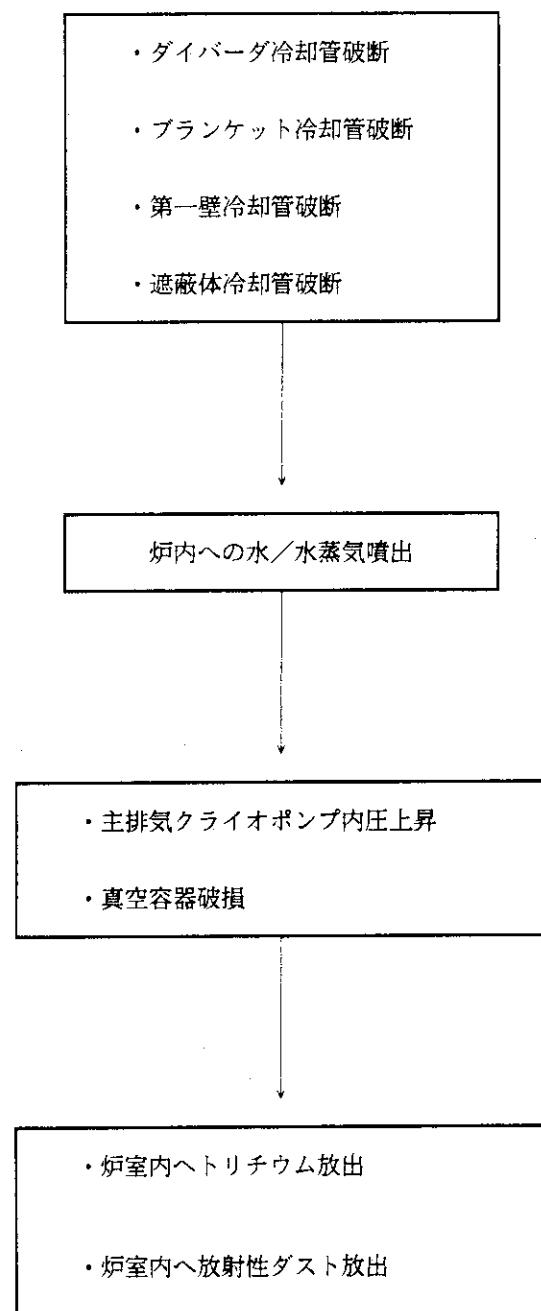


図4.1 大量のトリチウムが炉建家内に放出される事故シナリオの一例

5. トリチウム安全系設計

5.1 全体設計

5.1.1 設備仕様

(1) 安全系

この設備に要求される機能を以下に列挙する。

(i) 換気空調設備は、管理区域と非管理区域とに分け、かつそれぞれの区域の機能に応じた系統分けを行なう。

(ii) 換気は、新鮮な外気を取り入れ、空気汚染の低い区域から高い区域に流れるようにし、かつ汚染の可能性のある区域からの排気は適切なフィルターを通して排気筒より放出する。また、トリチウム汚染の可能性がある区域からの排気は雰囲気トリチウム浄化設備（以後、TCS : Tritium Cleanup Systemと略す）を経た後、排気筒より放出する。

(iii) 各系統は、区域及び室の換気とともに除熱を十分に行える容量を有するものとする。

(iv) 炉建家内でのトリチウム放出事故の際に、室内空気を浄化して環境に放出されるトリチウム量を低減し、かつ炉建家内の負圧を維持する機能を備えたTCSを設ける。

(v) 安全上重要な機能を有する設備は、商用電源喪失時に動的機器の单一故障を想定しても所要の機能を確保できるようにする。

(2) 炉建家内各室の設計条件

トリチウム安全系の対象となる各室設計条件（ゾーン区分、温湿度、機器、発熱量、室容積、室面積）を表5.1に示す。表中、代表的な室、区域についてトリチウムの発生量（通常運転時、分解修理時、故障時）と最大滞在人数の予想値を示した。しかし、作業者の被曝評価を行なうための室毎の滞在時間については、作業内容、作業の方法（遠隔作業の度合い）、放射線防護具の選定等、今後の検討が必要であり空欄としている。

5.1.2 全体系構成

トリチウム安全系の全体構成の概念を図5.1に示す。その考え方を以下に列挙する。

(i) ゾーン区分は、レッド（R）、アンバー（A）、グリーン（G）及びホワイト（W）の4段階とする。

(ii) トリチウムの閉じ込めは、多重隔壁格納の考え方に基づく第1次～3次格納設計を行なう。

(iii) 第1次格納系（炉周辺設備等）、第2次格納系（室、セル、フード、グローブボックス等）の排出ガスは排出ガス浄化設備で処理する。

(iv) グリーン（G）及びホワイト（W）区域は、トリチウムの発生がないのでトリチウム格

納系の対象区域としない。

(v) 通常運転時における各室のトリチウム発生量（室内漏洩量）の総和は2630Ci／年（表5.1参照）であり、年間のトリチウム放出管理目標値(250Ci/年)を大幅に上回る。したがって、当該区域について通常時用のTCS系を設置する。

(vi) 分解修理時にトリチウムの発生のある区域についても年間のトリチウム放出管理目標を大幅に上回る可能性があることから、専用TCSと通常の換気空調設備を設置し、必要に応じて切り替え運転が行えるようにする。

(vii) 事故時にトリチウムが発生する室、区域については、通常運転時及び事故時のいずれにおいてもトリチウム発生があるものとして、通常時用TCS系及び事故時用TCS系を設置し、切り替え運転が行えるようにする。

(viii) 以上のすべてのTCS系は、環境へ放出されるトリチウム量の低減化のために再循環方式とし、排気筒への排出量は負圧維持に必要な風量とする。

(ix) 換気空調設備(HVAC系)のうち、レッド、アンバー、グリーン系統についてはワンスルーワーク方式とし、ホワイト系統については汚染の可能性がないので冷暖房負荷の低減を図るために再循環方式とし、排気は排気筒を経由せずに直接大気に放出する。

5.2 換気空調設備(HVAC系)

5.2.1 設計条件

(1) 外気条件⁽¹⁸⁾

表5.2に掲げる諸値とする。ここで、夏期条件は1971-1980年の8月1ヶ月の時刻別観測値に基づく値であり、冬期条件は1962-1968年の1月1ヶ月の時刻別観測値に基づく値である。

(2) 室内温湿度条件

レッド、アンバー、グリー、ホワイトのいづれについても以下の値とする。

室温： 最高40°C、最低10°C

相対湿度： 60%未満

(3) HVAC系給気温度

夏期、冬季に係わらず20°Cとする。

(4) 室内発熱条件

発熱源として以下の4項目を考慮する。

機器：表5.1に示す値とする。

照明：一律に10W/m²

建家構造体：外気に面した壁、天井について考慮する。

人体：表5.1に示す各室の最大滞在人数に基づく。

(5) 最小換気回数

ゾーン区分された各区域毎に以下の換気回数を確保する。

- レッド区域 : 1.0回/h以上
 アンバー区域 : 1.0回/h以上
 グリーン区域 : 0.5回/h以上
 ホワイト区域 : 1.0回/h以上

(6) その他

ゾーン区分、室容積、床面積等の諸元は表5.1に示す値とする。

5.2.2 系統設計

換気空調設備（H V A C系）、霧囲気トリチウム浄化設備（T C S系）及び排出ガス処理設備（T W T）を含む全系統構成図を図5.2に示す。H V A C系の設計上の重要パラメーターの考え方を以下に述べる。

(1) 負圧制御方式

レッド、アンバー及びグリーンゾーンにおける霧囲気圧力は、トリチウム汚染の拡大を防止するため、霧囲気流れが建家外（大気圧）→第3次格納隔壁→第2次格納隔壁の順となるように段階的に設定される（隔壁間の差圧：それぞれ10-30mmAq）。本設計では、各室の排気量制御による負圧制御を行なう。

(2) 換気方式

レッド、アンバー及びグリーンゾーンの各室についてはワンススルーワーク方式とし、ホワイトゾーンについては再循環方式を主とする。

(3) T S C系との系統切り換え

レッドゾーンのうち、分解修理時にトリチウムが発生する室についてはH V A C系とT C S系の2系統を設置し、ダンパによる系統切り換えを行なうものとする。

(4) ローカルクーラー

次項に述べるようにT C S系対象室の換気風量は、室内空气中トリチウム濃度を1 MPCa以下とする風量であり、この風量で除去できない熱負荷はH V A C系の機器として設置するローカルクーラーで処理する。

(5) 冷凍機及び冷水ポンプ

空調機内の冷却コイル及びローカルクーラーへの冷水供給設備（冷凍機、冷水ポンプ）を設置する。

(6) 予備機器

安全上重要な以下の設備機器については予備機を備える。

- (i) レッド系統：送風機、排風機
- (ii) アンバー、グリーン系統：排風機
- (iii) ホワイト系統：送風機、排風機、循環送風機
- (iv) レッド、アンバー、グリーン系統：排気フィルタ
- (v) その他：冷凍機、冷水ポンプ

5.2.3 換気風量

ホワイト, グリーン, アンバー及びレッドゾーンを対象とするH V A C系の換気風量を表5.3-5.6に示す。表中, 各室の決定風量は, 熱負荷に基づく換気量と換気回数に基づく風量のうち卓越する値を示す。なお, レッドゾーンについては分解修理時用T C S対象室の換気風量も示した。

5.2.4 機器設計

H V A C系の機器諸元を機器リスト(表5.10-5.18)に示す。

5.3 霧囲気トリチウム浄化設備(T C S系)

5.3.1 設計条件

(1) 外気条件

5.2.1節の(1)項と同一とする。

(2) 室内温湿度条件

5.2.1節の(2)項と同一とする。

(3) 室内発熱条件

5.2.1節の(3)項と同一とする。

(4) T C Sのトリチウム除去効率(除染係数DF)

通常時, 分解修理時及び事故時のいかなる場合においても $DF=100$ が確保されるものとする。

(5) その他

ゾーン区分, 室容積, 床面積等の諸元は表5.1に示す値とする。

5.3.2 系統設計

炉建家トリチウム安全系の系統構成図を図5.2に, T C S系統図を図5.3に示す。T C S系統の設計上の重要パラメターの考え方を以下に述べる。

(1) 負圧制御方式

レッド及びアンバーゾーンにおける霧囲気圧力は, トリチウム汚染の拡大を防止するため, 霧囲気流れが建家外(大気圧)→第3次格納隔壁→第2次格納隔壁の順となるように階段的に設定される(隔壁間の差圧それぞれ10-30mmAq)。本設計では, 各室の給気量を制御することにより, 霧囲気圧力, 空気漏洩率及びT C S系より排出する空気量とのバランスを保つ負圧制御方式を採用する。

(2) 通常時用T C S系と事故時用T C S系との系統切り換え

本設計検討では, クレーンホールは通常時及び事故時にトリチウムが発生し, それぞれの状態に対応する専用のT C S系を設備することにしている。これは, 大量トリチウムの放出事故が発生した当該区域から他のT C S対象室への汚染の拡大防止ならびに霧囲気浄化処理時間を事故の内容及び規模に応じて適宜調節する設備のフレキシビリティを考慮したためである。

(3) 分解修理時用 TCS 系

本検討では、炉内構造物の分解修理作業が同時に 3 室以上の区域で行なわれることが無いとし、2 室の霧囲気浄化能力を備えた TCS を考える。

(4) TCS 系のプロセス構成

欧米、日本のトリチウム取り扱い施設で採用されており、しかも工業技術として数10年の実績のある触媒酸化・水分吸着法を採用する。触媒としては Pd, Pt 等を添着させたアルミナ触媒、吸着材としてはゼオライト系の水分吸着材を想定する。霧囲気中のトリチウムとして T_2 , DT, HT 及びトリチウム水を対象とする TCS では、除染係数 (DF) が 100 以上となるように触媒酸化温度 (200°C) 及び吸着温度 (室温) を設定する。一方、第 1 次及び第 2 次格納系からのトリチウムを含む排ガスを浄化する排出ガス処理設備 (TWT) では炭化水素系のトリチウム化合物が含まれることを想定して触媒酸化温度を 600°C とする。

5.3.3 換気風量

レッドゾーン及びアンバーゾーンの各室における所要換気風量の計算、制御手順を図 5.4 に示す。ここで所要風量は、対象室内トリチウム濃度を $1 \text{ MPCa} (= 5 \times 10^{-6} \text{ Ci/m}^3 = 1.85 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3)^*$ 以下とする風量であり、この風量で除去できない熱負荷はローカルクーラーで処理するものとする。

* 科技庁告示 15 号 (4 条) に基づく管理区域の空気中濃度限度 $2.1 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3$ とほぼ同等の値である。

本フローチャートに基づく計算例を以下の図に示す。

図 5.5 : 通常運転時のクレーンホール換気風量

トリチウム発生量 : 0.6 Ci/d ,

室容積 : 102300 m^3 ,

建家漏洩率 : $10 \text{ vol\%}/\text{d}$,

発熱負荷 : 837400 Kcal/h

図 5.6 : NBI 付属設備関連室換気風量

トリチウム発生量 : 0.6 Ci/d ,

室容積 : 101130 m^3 ,

建家漏洩率 : $200 \text{ vol\%}/\text{d}$,

発熱負荷 : 656600 Kcal/h

図 5.7 : 事故時のクレーンホール換気風量

トリチウム放出量 : $22 \times 10^4 \text{ Ci}$

室容積 : 102300 m^3 ,

建家漏洩率 : $10 \text{ vol\%}/\text{d}$,

発熱負荷 : 837400 Kcal/h

TCS系（通常時用）運転時のレッドゾーン及びアンバーゾーンの各室における所要換気風量をそれぞれ表5.7, 表5.8に示す。分解修理時の換気風量は表5.6に示した。なお、事故時のクレーンホール換気風量の詳細計算については6章（補足検討）において説明する。

(6) トリチウムの総排出量、空気中濃度限度

TCS系（通常時用及び分解修理時用）及びHVAC系の換気量（給気量、排気量、循環量）と建家からの1日当たりトリチウム排出量に関する計算結果を表5.9に示す。主なパラメータを以下に示す。

レッドゾーン総容積 :	639690m ³
アンバーゾーン総容積 :	122275m ³
スタック総排気量 :	317760m ³ /h (通常時) 313080m ³ /h (分解修理時最大)
トリチウム排出量 :	4.506×10^{-2} Ci/d (16.5Ci/y)
スタック平均濃度 :	6×10^{-9} Ci/m ³ (2.22×10^2 Bq/2m ³)
事故時トリチウム排出量 :	3.7Ci (T _{1/2} 22g放出)

ここで、通常時、分解修理時及び事故時を考慮した3月間のスタック排出トリチウムをトリチウム水とした場合の平均濃度は次のようになる。

$$\begin{aligned} & [4.506 \times 10^{-2}(\text{Ci}/\text{d}) \times 90(\text{d}) + 3.7(\text{Ci})] / (313080(\text{m}^3/\text{h}) \times 24(\text{h}/\text{d}) \times 90(\text{d})) \\ & = 1.15 \times 10^{-8} \text{Ci/m}^3 \\ & = 4.25 \times 10^2 \text{Bq/m}^3 \end{aligned}$$

これは、法規制値「事業所の境界の外の空気中の放射性同位元素の濃度限度は、3月間についてのトリチウム水に関する平均濃度 5×10^3 Bq/m³」を1桁下回る値である。

(7) 放射性廃液発生量

通常時用及び分解修理時用TCSからの放射性廃液発生量は、次節に示すように約15m³/dであり、大規模なトリチウム廃液処理設備が必要となる。トリチウム廃液発生量を低減するには、次のような方策が考えられる。

(i) レッドゾーンに係わる建家及び室の気密度を高める。（本設計における気密度を1/10とすることにより廃液量が1/10となる）。

(ii) ゾーン区分を見直し、通常時TCS系を運転する対象区域を削減する。このためには第2次格納隔壁を強化し、例えば、クレーンホールのような容積の大きい室では事故時以外にトリチウムの発生が無いようにする。これにより、当該区域の通常時の換気はHVAC系によるワンススルーバンク運転とすることができる。この閉じ込め方式は、TPL（原研）、TSTA（米国）、KTL（ドイツ）、ETHEL（イタリア）等の大量トリチウム（1-100g）取り扱い施設で採用されているものである。

5.3.4 機器設計

TCS系の機器諸元を機器リスト（表5.14～5.18）に示す。

TCS系の運転時に必要となるローカルクーラー設備は、HVAC系との共通設備として表5.19に示した。なお、この設備の心臓部とも言うべき触媒酸化塔 ($T_2 + 1/2 O_2 \rightarrow T_2O$ 反応によりトリチウム水に転換) と乾燥塔 (T_2O を含む雰囲気中の水分を吸着捕集) の設計計算法については6章に示す。

5.4 設備レイアウト

5.4.1 機器配置

(1) 換気空調設備

(i) ホワイトゾーン系統の給・排気設備（冷凍機、冷水ポンプを含む）及びトリチウム汚染の可能性が無いTCS用冷凍機は、地上階2FLのHVAC室（COLD）に配置する（図5.8）。

(ii) レッド、アンバー及びグリーン系統については、トリチウム汚染の可能性の無い給気設備と汚染の可能性がある排気設備を独立とし、それぞれ地上階1FLに独立のHVAC室（HOT）に配置する（図5.9）。

(iii) 保守頻度が高いと考えられるHVAC用及びTCS用の冷凍機、冷水ポンプは2FLのHVAC室（COLD）に配置する。

(iv) レッド、アンバー及びグリーン系統の排気フィルタは、放射化ダスト汚染の可能性があるので、遠隔交換作業性を考慮する。

(v) HVAC設備室の機器は、ダクトルート（配置図中、細線で示すダクトスペース（DS／PS））を考慮して配置する。また、ダクト内流体とゾーン区分との整合を図る。

(vi) ローカルクーラーについては、表5.20に設置対象室及び設備寸法を示すが、配置の詳細については今後の課題として図示していない。

(vii) 動力盤、制御盤塔の盤類の配置についても未検討であり、図示していない。

(2) 雰囲気トリチウム浄化設備

(i) 通常時用TCS系（3系統）と排出ガス浄化設備（TWT）は、地下階B1FLに配置する（図5.10）。ただし、TWTについては対象となる排出ガスの流量、化学組成等が不明であるため、設備設計を行っていない。

(ii) 分解修理時用TCS系（1系統）及び事故時用TCS（2系統）は、地下階B4FLに配置する（図5.11）。

(iii) 予熱器及び再生用ガス加熱器は、ヒータ容量が大きいので分割型とする。

(iv) フィルタは、遠隔交換性を考慮した配置とする。

また、ダクト内流体とゾーン区分との整合を図る。

(v) ローカルクーラーについては、表5.20に設置対象室及び設備寸法を示すが、配置の詳細

については今後の課題として図示していない。

(vi) 動力盤、制御盤等の盤類の配置についても未検討であり、図示しない。

5.4.2 機器配置上の問題点

本設計検討では、現在のF E R建家設計条件においてH V A C系設備及びT C S設備を配置することを試みた。この結果、以下の点においてこれまでの建家レイアウト設計を見直すべきであることが分かった。

(i) 通常時用T C S系(3系統)の設置スペース(地下階B 1 F)に余裕がない。このため、予熱器と再生用ガス加熱器を系統毎に3層の立体配置としたが、保守、交換のためのスペース確保が困難である。

(ii) 事故時用T C S系を地下階B 4 F Lに配置したが、事故発生の当該場所(クレーンホール)は地下階にあり、ダクト長が大きく事故発生時のT C S系の起動応答の遅れやダクトを介した汚染の拡大の可能性が増す。本T C S系の設置場所はクレーンホールに近接させるべきである。

(iii) すべてのT C S系(通常時用、分解修理時用、事故時用)及びT W Tは、比較的大型の機器で構成されかつトリチウム透過漏洩の起こり易い機器が多い。また、これらの設備は、常時トリチウム廃液が発生するものであり、保守時には被ばく危険度の高いトリチウム水を取り扱うことが多い。したがって、T C S系とT W Tを異なる階層に分散配置することは望ましくない。できるかぎり集中管理し易い建家配置とするべきであろう。

5.5 ユーティリティ諸元

換気空調設備及び雰囲気トリチウム浄化設備の所要電力をそれぞれ表5.21、表5.22に示す。また、水、蒸気、ガスを表5.23に示す。

表5.1 核融合実験炉(FER)建家の諸元(1)

階層	設備室名	ゾーン	室温(℃)	湿度(%)	通常運転時		分解修理時		事故時		最大滞在人数		備考
					トリチウム発熱量(NW)	トリチウム許容発生量(Bq/d)	トリチウム発熱量(MW)	トリチウム許容発生量(GJ/d)	トリチウム発熱量(NW)	トリチウム許容発生量(GJ/d)	トリチウム許容発生量(m³)	トリチウム許容発生量(m³)	
B4F	非常用発電機室	W	10~40	<60	0.2						29,160	2,916	2
B4F	一次冷却水排水貯槽室	R	10~40	<60	—	0.6					53,200	5,320	2
B4F	燃料系設備室	R	10~40	<60	0.1	0.6					30,700	3,070	2
B4F	水平ダクト(電源系)	W	10~40	<60	—						2,560	256	
B4F	水平ダクト(冷却系)	G	10~40	<60	—						5,120	512	
B4F	輸入エリア	G	10~40	<60	—						5,120	512	
B4F	分修通路	R	10~40	<60	—			0.6			2,560	256	
B4F	炉本体下部	A	10~40	<60	—						900	60	
B4F	炉本体配管ベース	A	10~40	<60	—						1,450	145	
B4F	クライオバケット外周ハーフキット	A	10~40	<60	—						16,300	1,630	
B4F	トリチウム処理設備室	R	10~40	<60	0.1	6×10 ⁻⁵					30,000	3,000	2
B4F	D S / P S	G	10~40	<60	—						4,680	468	
B3F	建家付帶電気設備室	W	10~40	<60	0.5						29,160	2,916	2
B3F	一次冷却器熱交換器室	R	10~40	<60	0.02	0.6					53,200	5,320	2
B3F	燃料系設備室	R	10~40	<60	0.1	0.6					30,700	3,070	2
B3F	水平ダクト(電源系)	W	10~40	<60	—						2,560	256	
B3F	水平ダクト(冷却系)	G	10~40	<60	—						5,120	512	
B3F	輸入エリア	G	10~40	<60	—						5,120	512	
B3F	分修通路	R	10~40	<60	—						2,560	256	

表5.1 核融合実験炉(FER) 建家の諸元(2)

階層	設備室名	室温 (°C)	湿度 (%)	通常運転時			分解修理時			事故時			最大満在人数	備考
				発熱量 (MW)	トリチウム許容濃度 (Ci/d)	トリチウム発生量 (Ci/d)	発熱量 (MW)	トリチウム許容濃度 (Ci/d)	トリチウム発生量 (Ci/d)	発熱量 (MW)	トリチウム許容濃度 (Ci/d)	トリチウム発生量 (Ci/d)		
B3F	炉本体下部配管スペース	A	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	725	145
B3F	真空排気ポンプ室	R	10~40	<60	0.5	0.6	-	-	-	-	-	-	16,300	4
B3F	円筒壁内分修通路	R	10~40	<60	-	-	-	-	0.6	-	-	-	30,000	4
B3F	DS/PS	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	4,680	4
B2F	RF増幅器室	W	10~40	<60	0.226	-	-	-	-	-	-	-	29,160	4
B2F	一次冷却器機器室	R	10~40	<60	-	0.6	-	-	-	-	-	-	53,200	4
B2F	NBIビームダンプ室	R	10~40	<60	0.1	0.6	-	-	-	-	-	-	4,800	480
B2F	水平ダクト(電源系)	W	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	2,560	256
B2F	水平ダクト(冷却系)	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	5,120	512
B2F	輸入エリア	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	5,120	512
B2F	分修通路	R	10~40	<60	-	-	-	-	0.6	-	-	-	2,560	256
B2F	水平ポートエリア	R	10~40	<60	0.1	-	-	-	-	-	-	-	16,300	4
B2F	円筒壁内分修通路	R	10~40	<60	-	-	-	-	0.6	-	-	-	25,200	4
B2F	DS/PS	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	4,680	480
B2F	NBIイオン注入室および ～1Fその他付属設備室	R	10~40	<60	0.5	0.6	-	-	-	-	-	-	101,130	6,657
B1F	RF増幅器室	W	10~40	<60	0.226	-	-	-	-	-	-	-	29,160	4
B1F	一次冷却器機器室	R	10~40	<60	-	0.6	-	-	-	-	-	-	53,200	4
B1F	水平ダクト(電源系)	W	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	2,560	256
B1F	水平ダクト(冷却系)	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	5,120	512

表5.1 核融合実験炉(FER)建家の諸元(3)

階層	設備室名	室温 (°C)	湿度 (%)	通常運転時		分解修理時		事故時		最大滞在人数				備考
				発熱量 (MW)	トリチウム許容発生量 (Ci/d)	発熱量 (MW)	トリチウム許容発生量 (Ci/d)	発熱量 (MW)	トリチウム許容発生量 (Ci/d)	発熱量 (MW)	トリチウム許容発生量 (Ci/d)	発熱量 (MW)	トリチウム許容発生量 (Ci/d)	
B1F	搬入エリア	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
B1F	分修通路	R	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
B1F	一次冷却設備主ハッダリフ	A	10~40	<60	-	0.6	-	-	-	-	-	-	-	
B1F	トリチウム処理設備室	R	10~40	<60	1.28×10^{-3}	0.6	-	-	-	-	-	-	-	
B1F	DS/PS	W	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1F	RF増幅器室	W	10~40	<60	0.226	-	-	-	-	-	-	-	-	
1F	H V A C 室(HOT)給氣	W	10~40	<60	40×10^{-3}	-	40×10^{-3}	-	-	-	-	-	-	
1F	H V A C 室(HOT)排氣	A	10~40	<60	0.127	-	0.127	-	-	-	-	-	-	
1F	水平ダクト(電源系)	W	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1F	水平ダクト(冷却系)	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1F	搬入エリア	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1F	分修通路	R	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1F	炉本体室	R	10~40	<60	0.7	0.6	-	-	-	-	-	-	-	
1F	円筒壁内DS/PS	A	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1F	DS/PS	W	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2F	H V A C 室(COLD)	W	10~40	<60	93.5×10^{-3}	-	-	93.5×10^{-3}	-	-	-	-	-	
2F	円筒壁内DS/PS	A	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2F	搬入エリア	G	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2F	分修通路	R	10~40	<60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

表5.1 核融合実験炉(FER) 建家の諸元(4)

表5.2 設計外気条件

	夏 期	冬 期
乾球温度 °C	32.9	-5.0
湿球温度 °C	27.0	-6.9
相対湿度 %	64.0	57.0
露点温度 °C	25.0	-11.1
エンタルピ k cal/kg 空気	20.3	-0.032
絶対湿度 kg 水/kg 空気	0.0202	0.0014

表5.3 ホワイトゾーンを対象とするHVAC系仕様

EL 部屋番号	部屋名	面積 (m ²)	容積 (m ³)	最小換気回数 (回/h)	夏季 斯温 敵						換気量 (m ³ /h)	換気回数 (回/h)	備考
					DB (°C)	RH (%)	内部負荷 (Kcal/h)	照 明 負荷 (Kcal/h)	機 運 負荷 (Kcal/h)	計 風量 (m ³ /h)			
B4F	- 非常用発電機室	2916	29160	1.0	10~40	<60	172000	29160	-	201200	34930	1.2	ワントス・スルー
B4F	- 水平ダクト (電源系)	256	2560	1.0	10~40	<60	-	2560	-	2600	450	2560	1.0
B3F	- 建物付帯電気設備室	2916	29160	1.0	10~40	<60	430000	29160	-	459200	79720	2.7	
B3F	- 水平ダクト (電源系)	256	2560	1.0	10~40	<60	-	2560	-	2600	450	2560	1.0
B2F	- RF増幅器室	2916	29160	1.0	10~40	<60	194360	29160	-	223600	38810	3.3	
B2F	- 水平ダクト (電源系)	256	2560	1.0	10~40	<60	-	2560	-	2600	450	2560	1.0
B1F	- RF増幅器室	2916	29160	1.0	10~40	<60	194360	29160	-	223600	38810	3.3	
B1F	- 水平ダクト (電源系)	256	2560	1.0	10~40	<60	-	2560	-	2600	450	2560	1.0
1F	- RF増幅器室	2916	29160	1.0	10~40	<60	194360	29160	33400	251000	44610	44610	1.5
1F	- HVAC室 (HOT)給気	2660	26600	1.0	10~40	<60	34640	26600	156600	218200	37880	37880	1.4
1F	- 水平ダクト (電源系)	256	2560	1.0	10~40	<60	-	2560	1600	4200	730	2560	1.0
1F	- D S / P S	312	3120	1.0	10~40	<60	-	3120	-	3200	550	3120	1.0
2F	- HVAC室 (COLD)	2916	29160	1.0	10~40	<60	80410	29160	161325	270900	47040	47040	1.6
2F	- D S / S P	312	3120	1.0	10~40	<60	-	3120	(a) 8600 (b) 22200	34000	5890	5890	1.9
2F	- 水平ダクト (電源系)	256	2560	1.0	10~40	<60	-	2560	22503	25100	4360	4360	1.7

表5.4 グリーンゾーンを対象とするHVAC仕様(1)

E L 部屋 番号	部屋 名 称	面積 (m ²)	容積 (m ³)	最換気 回数 (回/h)	夏 期 設 備 条 件						備考		
					D B (°C)	R H (%)	内 部 負 荷 (Kcal/h)	照 明 負 荷 (Kcal/h)	轉造 体 負 荷 (Kcal/h)	風 量 (m ³ /h)	決 定 風 量 (m ³ /h)		
B4F	水平ダクト (冷却系)	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
B4F	搬入エリア	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
B4F	DS/PS	468	4680	0.5	10~40	<60	—	4680	—	4700	820	2340	0.5
B3F	水平ダクト (冷却系)	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
B3F	搬入エリア	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
B3F	DS/PS	468	4680	0.5	10~40	<60	—	4680	—	4700	820	2340	0.5
B2F	水平ダクト (冷却系)	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
B2F	搬入エリア	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
B2F	DS/PS	468	4680	0.5	10~40	<60	—	4680	—	4700	820	2340	0.5
B1F	水平ダクト (冷却系)	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
B1F	搬入エリア	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
1F	水平ダクト (冷却系)	512	5120	0.5	10~40	<60	—	5120	—	5200	910	2560	0.5
1F	搬入エリア	512	10240	0.5	10~40	<60	—	5120	29850	35000	6080	6080	1.2
2F	搬入エリア	250	2500	0.5	10~40	<60	—	2500	3700	6200	1080	1250	0.5
3F	搬入エリア	400	4000	0.5	10~40	<60	—	4000	28297	32300	5610	5610	1.4

表5.4 グリーンゾーンを対象とするHVAC系仕様 (2)

表5.5 アンバーノーナーを対象とするHVAC系仕様

表5.6 レッドゾーンを対象とするHVAC系及びTCS系(分解修理時用)仕様

表5.7 レッドゾーンを対象とする通常時用TCS系仕様(1)

表5.7 レッドゾーンを対象とする通常時用TCS系仕様(2)

E.L	部屋番号	部屋名	床面積(m ²)	容積(m ³)	換気回数(回/h)	最小換気量(m ³ /h)	夏期換気設備						計件数	風量(m ³ /h)	インリーグ量(排気量)(m ³ /h)	換気回数(回/h)	備考
							D.B	R.H	内部負荷(Kcal/h)	照明負荷(Kcal/h)	機造体負荷(Kcal/h)	負荷計(Kcal/h)					
B2F	-	NBIイオン源室1	1137	34110	-	10~40	<60	116176	11370	48891	176500	30650	-	-	-	-	-
B2F	-	NBIイオン源室2	591	17730	-	10~40	<60	60387	5910	25413	91710	15930	-	-	-	-	-
B2F	-	NBI付属設備室1	788	7880	-	10~40	<60	26839	7880	-	34800	6050	-	-	-	-	-
B2F	-	NBI付属設備室2	300	3000	-	10~40	<60	10218	3000	-	13300	2310	-	-	-	-	-
B2F	-	NBI付属設備室3	300	3000	-	10~40	<60	10218	3000	-	13300	2310	-	-	-	-	-
B1F	-	NBI付属設備室4	788	7880	-	10~40	<60	44277	7880	-	52200	9070	-	-	-	-	-
B1F	-	NBI付属設備室5	300	3000	-	10~40	<60	44277	3000	-	47300	8220	(合計)8450(0)	(合計)8450(0)	-	-	
B1F	-	NBI付属設備室6	300	3000	-	10~40	<60	44277	3000	-	47300	8220	-	-	-	-	-
B1F	-	NBI付属設備室7	480	4800	-	10~40	<60	16349	4800	-	21200	3680	-	-	-	-	-
1F	-	NBI付属設備室8	788	7880	-	10~40	<60	26839	7880	28340	63100	10960	-	-	-	-	-
1F	-	NBI付属設備室9	300	3000	-	10~40	<60	10218	3000	19020	32300	5610	-	-	-	-	-
1F	-	NBI付属設備室10	300	3000	-	10~40	<60	10218	3000	19020	32300	5610	-	-	-	-	-
1F	-	NBIエントランス	285	2850	-	10~40	<60	9707	2850	18580	31200	5420	-	-	-	-	-

表5.8 アンバーボーンを対象とする通常時用TCS系仕様

表5.9 実験炉建家におけるゾーン区分毎の換気風量とトリチウム排出量

ゾーン区分	換気・浄化系統	換気対象容積 (m ³)	換気風量 (m ³ /h)	トリチウム排出量 (Ci/d)
レッド	H V A C	116860	給気 152560 排気 118330	6×10^{-3}
	通常用 T C S	522830	給気 59450*2 排気 34230 循環 25220	3.69×10^{-2}
	分解修理用 T C S	70560*3	給気 10200*2 排気 最大 440 最小 9760	5.28×10^{-4}
アンバー	H V A C	105975	給気 107340 排気 105980	
	T C S	16300	給気 5100*2 排気 1360 循環 3740	1.63×10^{-3}
グリーン	H V A C	84660	給気 57860 排気 57860	
ホワイト	H V A C	223160	給気 347970*2 排気 72810 循環 275160	* 4

建家総容積 1069785 m³

スタック総排出量

通常時 317760 m³/h分解修理時 最大 313080 m³/hトリチウム総排出量 4.506×10^{-2} Ci/d (16.5 Ci/y)

* 1 分解修理時

* 2 H V A C 給気量と循環量の合計。

* 3 レッドゾーンのH V A C系対象容積に含まれる。

* 4 スタックを経由しないで低所排気。

表5.10 HVAC系(レッドゾーン)機器リスト

機器番号	機器名稱	基數	機器仕様	備考
—	送風機	2 (1基予備)	遠心式ファン, 所要動力: 132KW 概略寸法: $3.8m^L \times 3.4m^W \times 3.7m^H$	風量: 152600 m ³ /hr, 静圧: 300mmAq
—	排風機	2 (1基予備)	遠心式ファン, 所要動力: 220KW 概略寸法: $4.1m^L \times 3.5m^W \times 3.8m^H$	風量: 118400 m ³ /hr, 静圧: 450mmAq
—	ブレフィルタ (給氣)	1	バンク型,	処理風量: 152600 m ³ /hr (50 m ³ /min/枚×51枚)
—	H E P A フィルタ (給氣)	1	バンク型,	処理風量: 152600 m ³ /hr (50 m ³ /min/枚×51枚)
—	ブレフィルタ (排氣)	2 (1基予備)	バンク型,	処理風量: 118400 m ³ /hr (50 m ³ /min/枚×40枚)
—	H E P A フィルタ (排氣)	2 (1基予備)	バンク型,	処理風量: 118400 m ³ /hr (50 m ³ /min/枚×40枚)
—	加熱コイル	3	処理風量: 50900 m ³ /hr, 空気入口/出口温度: -5/20°C 概略寸法: $1.7m^L \times 0.3m^W \times 2.5m^H$	熱負荷: 366200Kcal/hr
—	冷却コイル	6	処理風量: 25500 m ³ /hr, 空気入口/出口温度: 32.9/15°C 概略寸法: $3.2m^L \times 0.4m^W \times 1.2m^H$	熱負荷: 315200Kcal/hr
—				
—				
—				

表5.11 HVAC系(アンバーノン)機器リスト

機器番号	機器名称	基 数	機 器 仕 様	備 考
—	送 風 機	2	遠心式ファン, 風量 : 53700 m ³ /hr, 所要動力 : 75kW 概略寸法 : 1.6m ^L × 2.2m ^W × 2.4m ^H	静圧 : 300mmAq
—	排 風 機	2 (1基予備)	遠心式ファン, 風量 : 106000 m ³ /hr, 所要動力 : 220kW 概略寸法 : 4.1m ^L × 3.5m ^W × 3.8m ^H	静圧 : 450mmAq
—	プレフィルタ (給気)	1	バンク型, 处理風量 : 107400 m ³ /hr (50 m ³ /min/枚 × 36枚)	
—	HEPAフィルタ (給気)	1	バンク型, 处理風量 : 106000 m ³ /hr (50 m ³ /min/枚 × 36枚)	
—	プレフィルタ (排気)	2 (1基予備)	バンク型, 处理風量 : 106000 m ³ /hr (50 m ³ /min/枚 × 36枚)	
—	HEPAフィルタ (排気)	2 (1基予備)	バンク型, 处理風量 : 106000 m ³ /hr (50 m ³ /min/枚 × 36枚)	
—	加熱コイル	2	処理風量 : 53700 m ³ /hr, 熱負荷 : 386500Kcal/hr 空気入口／出口温度 : -5/20°C 概略寸法 : 1.8m ^L × 0.3m ^W × 2.5m ^H	
—	冷却コイル	4	処理風量 : 26900 m ³ /hr, 熱負荷 : 332500Kcal/hr 空気入口／出口温度 : 32.9/15°C 概略寸法 : 3.2m ^L × 0.4m ^W × 1.3m ^H	
—				
—				
—				

表5.12 HVAC系(グリーンゾーン)機器リスト

機器番号	機 器 名 称	基 数	機 器 仕 様	備 考
—	送 風 機	2	遠心式ファン、 所要動力：45KW 概略寸法： $1.3\text{m}^L \times 1.8\text{m}^W \times 2.1\text{m}^H$	静圧：300mmAq
—	排 風 機	2 (1基予備)	遠心式ファン、 所要動力：110KW 概略寸法： $2.1\text{m}^L \times 2.4\text{m}^W \times 2.6\text{m}^H$	静圧：450mmAq
—	ブレフィルタ (給気)	1	バンク型、 処理風量：57900m ³ /hr (50m ³ /min/枚×20枚)	
—	HEPAフィルタ (給気)	1	バンク型、 処理風量：57900m ³ /hr (50m ³ /min/枚×20枚)	
—	ブレフィルタ (排気)	2 (1基予備)	バンク型、 処理風量：57900m ³ /hr (50m ³ /min/枚×20枚)	
—	HEPAフィルタ (排気)	2 (1基予備)	バンク型、 処理風量：57900m ³ /hr (50m ³ /min/枚×20枚)	
—	加熱コイル	1	処理風量：57900m ³ /hr 空気入口／出口温度：-5/20°C 概略寸法： $2.0\text{m}^L \times 0.3\text{m}^W \times 2.5\text{m}^H$	熱負荷：416600Kcal/hr
—	冷却コイル	2	処理風量：29000m ³ /hr 空気入口／出口温度：32.9/15°C 概略寸法： $3.2\text{m}^L \times 0.4\text{m}^W \times 1.3\text{m}^H$	熱負荷：358500Kcal/hr

表5.13 HVAC系(ホワイトゾーン)機器リスト

機器番号	機器名称	基數	機器仕様	備考
—	送風機	3 (1基予備)	遠心式ファン, 所要動力: 220KW 概略寸法: $4.1\text{m}^L \times 3.5\text{m}^W \times 3.8\text{m}^H$	静圧: 300mmAq
—	排風機	2	遠心式ファン, 所要動力: 75KW 概略寸法: $3.0\text{m}^L \times 2.8\text{m}^W \times 3.0\text{m}^H$	静圧: 200mmAq
—	循環送風機	3 (1基予備)	遠心式ファン, 所要動力: 150KW 概略寸法: $3.8\text{m}^L \times 3.4\text{m}^W \times 3.7\text{m}^H$	静圧: 137600mm ³ /hr, 250mmAq
—	ダレフィルタ	1	バンク型, 処理風量: $348000\text{m}^3/\text{hr}$ ($50\text{m}^3/\text{min}/枚 \times 116枚$)	
—	H E P A フィルタ	1	バンク型, 処理風量: $348000\text{m}^3/\text{hr}$ ($50\text{m}^3/\text{min}/枚 \times 116枚$)	
—	加熱コイル	3	処理風量: $116000\text{m}^3/\text{hr}$, 热負荷: 437700Kcal/hr 空気入口／出口温度: 6.9/20°C 概略寸法: $2.0\text{m}^L \times 0.4\text{m}^W \times 4.1\text{m}^H$	
—	冷却コイル	1 2	処理風量: $29000\text{m}^3/\text{hr}$, 热負荷: 273200Kcal/hr 空気入口／出口温度: 38.6/15°C 概略寸法: $2.9\text{m}^L \times 0.4\text{m}^W \times 1.4\text{m}^H$	

表5.14 通常時用TCS系機器リスト

機器番号	機器名 称	基 数	機 器	仕 様	備 考
—	フ イ ル タ	4	円筒形HEPAフィルタ、処理風量：5400 m ³ /hr, ケーシング寸法：1.0m φ × 2.5m ^H エレメント寸法：0.6m φ × 0.8m ^H		
—	循 環 プ ロ オ ア (1基予備)	2	ルーツ式プロア、 吸込／吐出圧力：1.0/1.6kg/cm ² abs. 概略寸法：3.5m ^L × 4.1m ^W × 2.0m ^H	処理風量：21600 m ³ /hr, 所要動力：600kW	
—	熱 交 換 器	1	多管式熱交(上下2段積)、伝熱面積：1074 m ² , 交換熱量：780000Kcal/hr 管側(空気)入口/出口温度：200/80°C, 脈側(空気)入口/出口温度：50/170°C 概略寸法：4.5m ^L × 1.0m ^W × 4.0m ^H		
—	予 热 器	9	電気ヒータ、ヒータ容量：200kW 入口／出口温度：20/200°C 概略寸法：600A × 2.6m ^L		
—	触 媒 酸 化 塔	2	堅形円筒 充填物：Pdアルミニナ触媒、充填量：4.2m ³ 概略寸法：3.0m φ × 2.0m ^H		
—	冷 却 器	1	多管式熱交、 管側(空気)入口/出口温度：0/3°C, 脈側(空気)入口/出口温度：80/5°C 概略寸法：2.0m φ × 4.5m ^L	伝熱面積：630m ² , 交換熱量：453100Kcal/hr	
—	凝 極 器	1	多管式熱交、 管側(空気)入口/出口温度：0/6°C, 脈側(空気)入口/出口温度：300/5°C 概略寸法：2.0m φ × 4.0m ^L	伝熱面積：470m ² , 交換熱量：910000Kcal/hr	
—	再 生 用 プ ロ オ ア (1基予備)	2	ルーツ式プロア、 吸込／吐出圧力：1.0/1.3kg/cm ² abs. 概略寸法：2.2m ^L × 3.0m ^W × 1.4m ^H	処理風量：10800 m ³ /hr, 所要動力：160kW	
—	再 生 用 加 热 器	9	電気ヒータ、ヒータ容量：200kW 入口／出口温度：20/350°C 概略寸法：600A × 2.6m ^L		
—	乾 燥 塔	4	堅形円筒 充填物：モレキュラーシープ5A, 充填量：10200kg 概略寸法：3.0m φ × 3.0m ^H		

*本TCSは3系統で構成される。表では1系統分の機器を示す。

表5.15 分解修理時用TCS系機器リスト

機器番号	機器名称	基數	機器仕様	備考
フイルタ	2	円筒形HEPAフィルタ、処理風量：5100m ³ /hr, ケーシング寸法：1.0m φ×2.5m ^H エレメント寸法：0.6m φ×0.8m ^H		
循環ブロア	(1基予備)	2	ルーツ式ブロア、処理風量：10200m ³ /hr, 所要動力：280kW 吸込／吐出圧力：1.0/1.6kg/cm ² abs, 概略寸法：2.2m ^L ×3.0m ^W ×1.4m ^H	
熱交換器	1	多管式熱交(上下2段積),伝熱面積：512m ² , 交換熱量：385000Kcal/hr 管側(空気)入口/出口温度：200/80°C, 胴側(空気)入口/出口温度：50/170°C 概略寸法：4.5m ^L ×0.8m ^W ×3.5m ^H		
予熱器	5	電気ヒータ；ヒータ容量：550A×2.6m ^L 入口／出口温度：20/200°C 概略寸法：		
触媒酸化塔	2	堅形円筒 充填物：Pdアルミニナ触媒、充填量：2.0m ³ 概略寸法：2.0m φ×2.0m ^H		
冷却器	1	多管式熱交、伝熱面積：300m ² , 交換熱量：214100Kcal/hr 管側(ワライ)入口/出口温度：0/3°C, 胴側(空気)入口/出口温度：80/5°C 概略寸法：1.6m φ×3.5m ^L		
凝縮器	1	多管式熱交、伝熱面積：220m ² , 交換熱量：430100Kcal/hr 管側(ワライ)入口/出口温度：0/6°C, 胴側(空気)入口/出口温度：300/5°C 概略寸法：1.5m φ×3.5m ^L		
再生用ブロア	(1基予備)	2	ルーツ式ブロア、処理風量：5100m ³ /hr, 所要動力：75kW 吸込／吐出圧力：1.0/1.3kg/cm ² abs, 概略寸法：1.9m ^L ×2.0m ^W ×1.2m ^H	
再生用加熱器	5	電気ヒータ；ヒータ容量：172kW 入口／出口温度：20/350°C 概略寸法：550A×2.6m ^L		
乾燥塔	4	堅形円筒 充填物：モレキュラーシーブ5A, 充填量：4600kg 概略寸法：2.0m φ×2.0m ^H		

表5.16 事故時用(前段) TCS系機器リスト

機器番号	機器名稱	基數	機器仕様	備考
—	フイルタ	1	円筒形HEPAフィルタ、処理風量：3000 m ³ /hr, ケーシング寸法：1.0m φ×2.3m ^H エレメント寸法：0.6m φ×0.5m ^H	
—	循環ブロア	2 (1基予備)	ルーツ式ブロア、処理風量：3000 m ³ /hr, 所要動力：90kW 吸込／吐出圧力：1.0/1.6kg/cm ² abs. 概略寸法：2.0m ^L × 1.5m ^W × 1.0m ^H	
—	熱交換器	1	多管式熱交(上下2段積)、伝熱面積：157 m ² , 交換熱量：113000Kcal/hr 管側(空気)入口/出口温度：200/80°C, 脈側(空気)入口/出口温度：50/170°C 概略寸法：4.2m ^L × 1.0m ^W × 2.3m ^H	
—	予熱器	2	電気ヒータ、ヒータ容量：131kW 入口／出口温度：20/200°C 概略寸法：550A × 2.5m ^L	
—	触媒酸化塔	2	堅形円筒 充填物：Pdアルミニナ触媒、充填量：0.6 m ³ 概略寸法：1.1m φ×1.0m ^H	
—	冷却器	1	多管式熱交、伝熱面積：90 m ² , 交換熱量：63000Kcal/hr 管側(フライ)入口/出口温度：0/3°C, 脈側(空気)入口/出口温度：80/5°C 概略寸法：1.2m φ×2.5m ^L	
—	凝縮器	1	多管式熱交、伝熱面積：66 m ² , 交換熱量：126500Kcal/hr 管側(フライ)入口/出口温度：0/6°C, 脈側(空気)入口/出口温度：300/5°C 概略寸法：1.0m φ×2.5m ^L	
—	再生用ブロア	2 (1基予備)	ルーツ式ブロア、処理風量：1500 m ³ /hr, 所要動力：30kW 吸込／吐出圧力：1.0/1.3kg/cm ² abs. 概略寸法：1.2m ^L × 1.1m ^W × 0.8m ^H	
—	再生用加熱器	2	電気ヒータ、ヒータ容量：131kW 入口／出口温度：20/350°C 概略寸法：500A × 2.5m ^L	
—	乾燥塔	4	堅形円筒 充填物：モレキュラーシーブ5A、充填量：1400kg 概略寸法：1.1m φ×1.0m ^H	

表5.17 事故時用（後段）TCS系機器リスト

JAERI-M 93-107

機器番号	機器名稱	基數	機器仕様	備考
—	フィルタ	1	円筒形RENAフィルタ、処理風量：500 m ³ /hr, ケーシング寸法：0.5m φ×1.5m ^H エレメント寸法：0.45m φ×0.5m ^H	
—	循環プロア	2 (1基予備)	ルーツ式プロア、 吸込／吐出圧力：1.0/1.6kg/cm ² abs. 概略寸法：1.2m ^L ×0.9m ^W ×0.8m ^H	ルーツ式プロア、 吸込／吐出圧力：1.0/1.6kg/cm ² abs. 概略寸法：1.2m ^L ×0.9m ^W ×0.8m ^H
—	熱交換器	1	多管式熱交(上下2段積)、伝熱面積：28.7m ² 、交換熱量：19000Kcal/hr 管側(空気)入口/出口溫度：200/80°C、胴側(空気)入口/出口溫度：50/170°C 概略寸法：3.9m ^L ×0.5m ^W ×1.0m ^H	多管式熱交(上下2段積)、伝熱面積：28.7m ² 、交換熱量：19000Kcal/hr 管側(空気)入口/出口溫度：200/80°C、胴側(空気)入口/出口溫度：50/170°C 概略寸法：3.9m ^L ×0.5m ^W ×1.0m ^H
—	予熱器	1	電気ヒータ、ヒータ容量：42kW 入口／出口溫度：20/200°C 概略寸法：250A×2.4m ^L	電気ヒータ、ヒータ容量：42kW 入口／出口溫度：20/200°C 概略寸法：250A×2.4m ^L
—	触媒酸化塔	2	壘形円筒 充填物：Pdアルミニナ触媒、充填量：0.1m ³ 概略寸法：0.5m φ×0.5m ^H	壘形円筒 充填物：Pdアルミニナ触媒、充填量：0.1m ³ 概略寸法：0.5m φ×0.5m ^H
—	冷却器	1	多管式熱交、 管側(ワイヤ)入口/出口溫度：0/3°C、 胴側(空氣)入口/出口溫度：80/5°C 概略寸法：0.6m φ×2.0m ^L	多管式熱交、 管側(ワイヤ)入口/出口溫度：0/3°C、 胴側(空氣)入口/出口溫度：80/5°C 概略寸法：0.6m φ×2.0m ^L
—	凝縮器	1	多管式熱交、 管側(ワイヤ)入口/出口溫度：0/6°C、 胴側(空氣)入口/出口溫度：300/5°C 概略寸法：0.6m φ×2.0m ^L	多管式熱交、 管側(ワイヤ)入口/出口溫度：0/6°C、 胴側(空氣)入口/出口溫度：300/5°C 概略寸法：0.6m φ×2.0m ^L
—	再生用プロア	2 (1基予備)	ルーツ式プロア、 吸込／吐出圧力：1.0/1.3kg/cm ² abs. 概略寸法：0.9m ^L ×0.9m ^W ×0.7m ^H	ルーツ式プロア、 吸込／吐出圧力：1.0/1.3kg/cm ² abs. 概略寸法：0.9m ^L ×0.9m ^W ×0.7m ^H
—	再生用加熱器	1	電気ヒータ、ヒータ容量：42kW 入口／出口溫度：20/350°C 概略寸法：250A×2.4m ^L	電気ヒータ、ヒータ容量：42kW 入口／出口溫度：20/350°C 概略寸法：250A×2.4m ^L
—	乾燥塔	4	壘形円筒 充填物：モレキュラーシーブ5A、充填量：300kg 概略寸法：0.5m φ×0.5m ^H	壘形円筒 充填物：モレキュラーシーブ5A、充填量：300kg 概略寸法：0.5m φ×0.5m ^H

表5.18 TCS系共通機器リスト

表5.19 HVAC系/TCS共通機器リスト(1)

機器番号	機器名 称	基 数	機 器 仕 様	備 考
—	冷水ポンプ	4 (1基予備)	遠心式, 流量 : 726 m ³ /hr, 所要動力 : 160kW 概略寸法 : 2.5m ^L × 1.5m ^W × 1.5m ^H	揚程 : 50mAQ
—	冷凍機	4 (1基予備)	ターボ冷凍機, 所要動力 : 840kW 概略寸法 : 6.1m ^L × 2.7m ^W × 3.3m ^H	冷凍能力 : 1200USRT
—	口一カルクーラー (一次冷却水排水貯槽室)	2	處理風量 : 10000 m ³ /hr, 所要動力 : 3.7kW 概略寸法 : 2.6m ^L × 1.3m ^W × 2.5m ^H	處理風量 : 1000 m ³ /hr, 所要動力 : 0.75kW 概略寸法 : 1.7m ^L × 1.0m ^W × 1.3m ^H
—	口一カルクーラー (燃料系設備室)	1	處理風量 : 4000 m ³ /hr, 所要動力 : 1.5kW 概略寸法 : 2.1m ^L × 1.0m ^W × 1.8m ^H	處理風量 : 1800 Kcal/hr, 熱負荷 : 55100Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAQ
—	口一カルクーラー (一次冷却設備熱交換器室)	2	處理風量 : 4000 m ³ /hr, 所要動力 : 1.5kW 概略寸法 : 2.1m ^L × 1.0m ^W × 1.8m ^H	處理風量 : 20800 Kcal/hr, 熱負荷 : 30mmAQ
—	口一カルクーラー (燃料系設備室)	1	處理風量 : 16000 m ³ /hr, 所要動力 : 7.5kW 概略寸法 : 3.0m ^L × 1.5m ^W × 2.7m ^H	處理風量 : 87600 Kcal/hr, 熱負荷 : 30mmAQ
—	口一カルクーラー (真空排気ポンプ室)	4	處理風量 : 18000 m ³ /hr, 所要動力 : 7.5kW 概略寸法 : 3.4m ^L × 1.6m ^W × 2.8m ^H	熱負荷 : 104300 Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAQ
—	口一カルクーラー (一次冷却設備ハサフク室)	2	處理風量 : 3000 m ³ /hr, 所要動力 : 1.5kW 概略寸法 : 1.9m ^L × 1.0m ^W × 1.3m ^H	熱負荷 : 12100 Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAQ
—	口一カルクーラー (NB1ビームダンプ室)	1	處理風量 : 11000 m ³ /hr, 所要動力 : 5.5kW 概略寸法 : 2.6m ^L × 1.3m ^W × 2.5m ^H	熱負荷 : 61700 Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAQ
—	口一カルクーラー (NB1イオン源室他)	6	處理風量 : 18000 m ³ /hr, 所要動力 : 7.5kW 概略寸法 : 3.4m ^L × 1.6m ^W × 2.8m ^H	熱負荷 : 101400 Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAQ

表5.19 HVAC系/TCS共通機器リスト(2)

機器番号	機 器 名 称	基 数	機 器 仕 様	備 考
—	ロ一カルクーラ (一次冷却設備ハザラ室)	2	處理風量 : 3000m ³ /hr, 熱負荷 : 12100Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAq 所要動力 : 1.5KW 概略寸法 : 1.9m ^L × 1.0m ^W × 1.3m ^H	B1F
—	ロ一カルクーラ (トリチウム処理設備室)	1	處理風量 : 1000m ³ /hr, 熱負荷 : 1800Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAq 所要動力 : 0.75KW 概略寸法 : 1.7m ^L × 1.0m ^W × 1.3m ^H	B1F
—	ロ一カルクーラ (炉本体室)	8	處理風量 : 18000m ³ /hr, 熱負荷 : 102600Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAq 所要動力 : 7.5KW 概略寸法 : 3.4m ^L × 1.6m ^W × 2.8m ^H	1F
—	ロ一カルクーラ (HVAC室(NOT) 排気)	2	處理風量 : 12000m ³ /hr, 熱負荷 : 69000Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAq 所要動力 : 5.5KW 概略寸法 : 2.6m ^L × 1.3m ^W × 2.5m ^H	1F
—	ロ一カルクーラ (円筒内 DS/PS)	8	處理風量 : 1000m ³ /hr, 熱負荷 : 53000Kcal/hr, 機外静圧 : 30mmAq 所要動力 : 0.75KW 概略寸法 : 1.7m ^L × 1.0m ^W × 1.3m ^H	2F

表 5.20 ローカルクーラーの設置場所と諸元

階 層	部 屋 名 称	ローカルクーラ仕様	ローカルクーラ寸法(㎜)
B 4 F	一次冷却水排水貯槽室	処理風量 $10,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 2台	$2600^L \times 2500^H \times 1300^W$
	燃料系設備室	処理風量 $1,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 1台	$1700^L \times 1275^H \times 980^W$
B 3 F	一次冷却設備 熱交換器室	処理風量 $4,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 2台	$2100^L \times 1775^H \times 980^W$
	燃料系設備室	処理風量 $16,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 1台	$3000^L \times 2700^H \times 1500^W$
	真空排気ポンプ室	処理風量 $18,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 4台	$3400^L \times 2800^H \times 1600^W$
B 2 F	一次冷却設備 バッファタンク室	処理風量 $3,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 2台	$1900^L \times 1275^H \times 980^W$
	N B I ビームダンプ室	処理風量 $11,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 1台	$2600^L \times 2500^H \times 1300^W$
	N B I イオン源室, 付属設備室 1 ~ 10 及び N B I エントラス	処理風量 $18,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 6台	$3400^L \times 2800^H \times 1600^W$
B 1 F	一次冷却設備 バッファタンク室	処理風量 $3,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 2台	$1900^L \times 1275^H \times 980^W$
	トリチウム処理設備室	処理風量 $1,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 1台	$1700^L \times 1275^H \times 980^W$
1 F	炉 本 体 室	処理風量 $18,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 8台	$3400^L \times 2800^H \times 1600^W$
	H V A C 室 (H O T) 排 気	処理風量 $12,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 2台	$2600^L \times 2500^H \times 1300^W$
2 F	円筒壁内 D S / P S *	処理風量 $1,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ 設置台数 8台	$1700^L \times 1275^H \times 980^W$

D S : ダクトスペース

P S : 配管通路

表5.21 H V A C系所要電力

機 器 名 称	台 数 (予備台数)*	1 台 当 り	
		出力(KW)	電圧(V)
ホワイト系送風機	3 (1)	220	440
ホワイト系排風機	2 (1)	75	440
ホワイト系循環送風機	3 (1)	150	440
グリーン系送風機	2	45	440
グリーン系排風機	2 (1)	110	440
アンバー系送風機	2	75	440
アンバー系排風機	2 (1)	220	440
レッド系送風機	2 (1)	132	440
レッド系排風機	2 (1)	220	440
一次冷却水排水貯槽室用 L/C	2	3.7	440
燃料系設備室(B4F)用 L/C	1	0.75	440
一次冷却設備熱交換器室用 L/C	2	1.5	440
燃料系設備室(B3F)用 L/C	1	7.5	440
真空排気ポンプ室用 L/C	4	7.5	440
一次冷却設備バッファタンク室(B2F)用 L/C	2	1.5	440
N B I ビームダンプ室用 L/C	1	5.5	440
N B I イオン源室他用 L/C	6	7.5	440
一次冷却設備バッファタンク室(B1F)用 L/C	2	1.5	440
トリチウム処理設備室(B1F)用 L/C	1	0.75	440
炉本体室用 L/C	8	7.5	440
H V A C 室(HOT)排氣用 L/C	2	5.5	440
円筒壁内 DS/PS用 L/C	8	0.75	440
冷凍機	4 (1)	840	440
冷却ポンプ	4 (1)	160	440

* () 内の数字は予備機の数を示す。

表5.22 TCS系所要電力

機器名称	台数 (予備台数)*	1台当たり	
		出力(kW)	電圧(V)
・通常時TCS (×3系統)			
循環プロア	6(3)	600	440
再生用プロア	6(3)	160	440
予熱器	27	200	440
再生用加熱器	27	200	440
・分修時TCS			
循環プロア	2(1)	280	440
再生用プロア	2(1)	75	440
予熱器	5	172	440
再生用加熱器	5	172	440
・事故時TCS (3000 m³/h)			
循環プロア	2(1)	90	440
再生用プロア	2(1)	30	440
予熱器	2	131	440
再生用加熱器	2	131	440
・事故時TCS (500 m³/h)			
循環プロア	2(1)	18.5	440
再生用プロア	2(1)	5.5	440
予熱器	1	42	440
再生用加熱器	1	42	440
冷凍機	4(1)	400	440
冷却ポンプ	4(1)	55	440

* : () 内の数字は予備機の数を示す。

表5.23 HVAC系, TCS系の所要ユーティリティ

	用 途	使 用 量	備 考
冷却水	H V A C 用冷凍機冷却水	44100 ℥/min	冷却水入口／出口温度 32°C / 37°C
	T C S 用冷凍機冷却水	13250 ℥/min	
	T C S 用プロア冷却水 ・通常時 T C S	130 ℥/min	
	・分修時 T C S	35 ℥/min	
	・事故時 T C S	45 ℥/min	
蒸 気	H V A C 暖房用蒸気	8265 kg/h	供給蒸気圧力 4.5 kg/cm ² G
ガス	T C S 用 H ₂ ガス		
	・通常時 T C S	32.4 m ³ /h	
	・分修時 T C S	5.1 m ³ /h	
	・事故時 T C S	1.75m ³ /h	

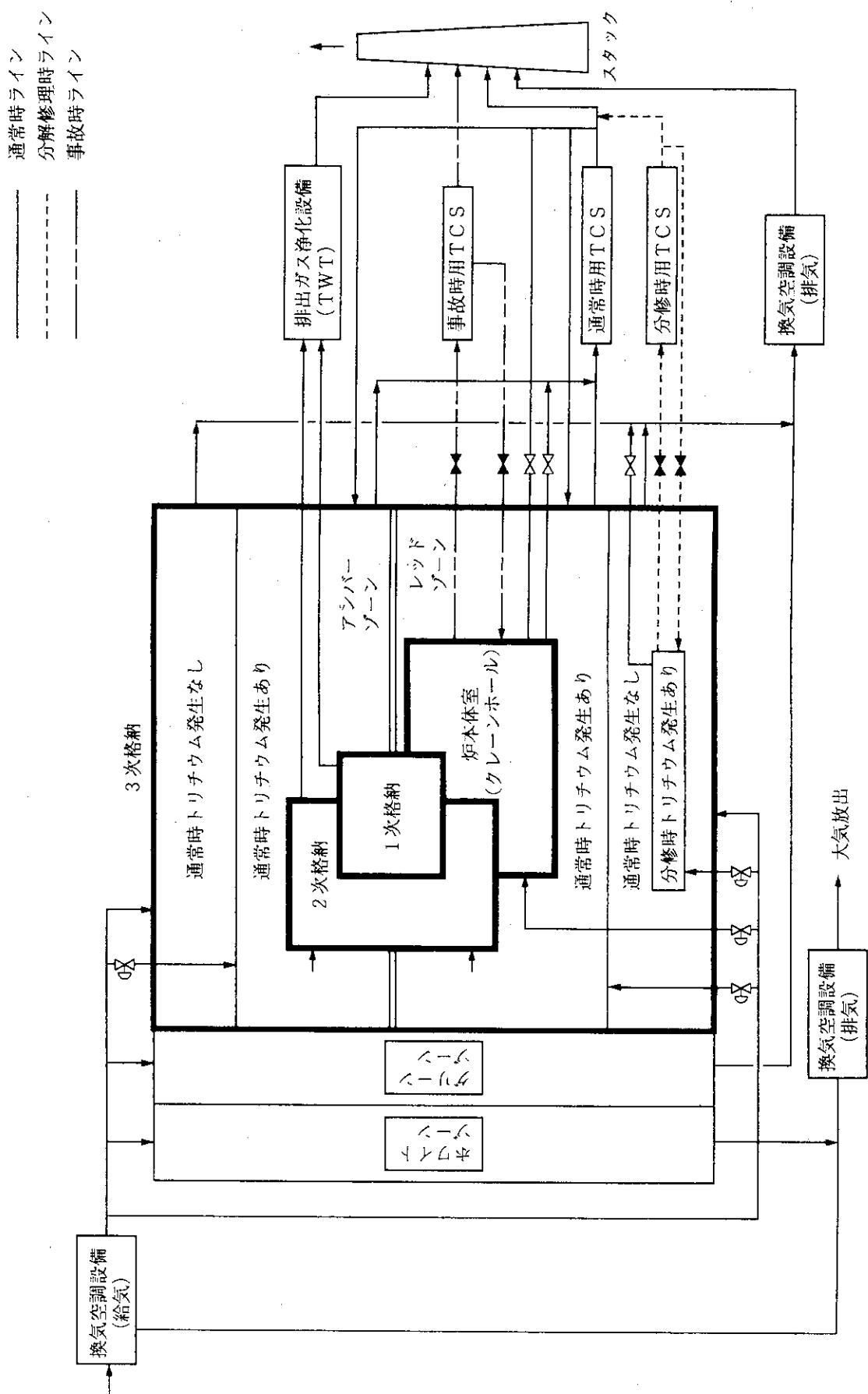


図5.1 炉建家のゾーン区分とトリチウム安全系の構成概念図

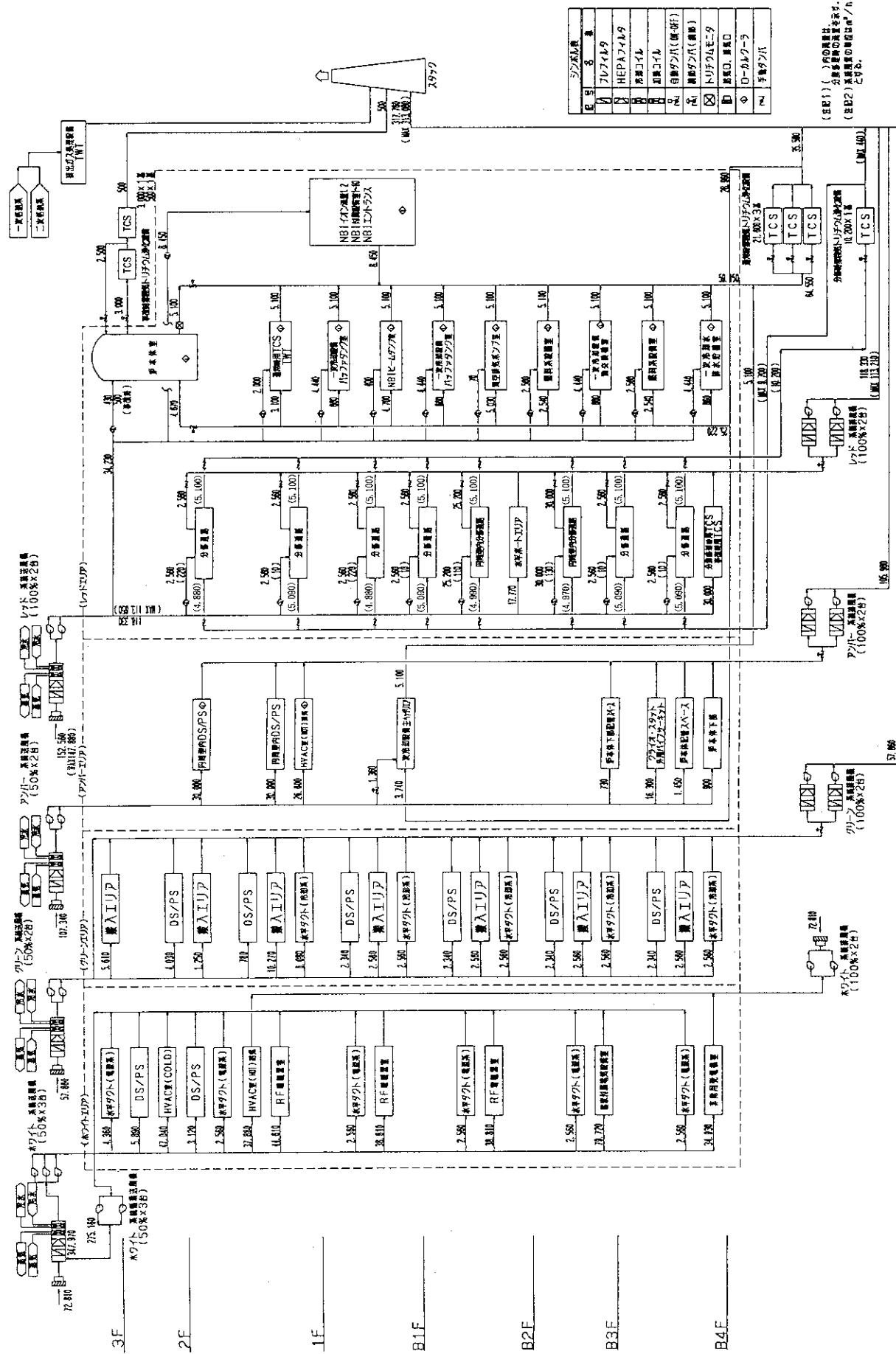
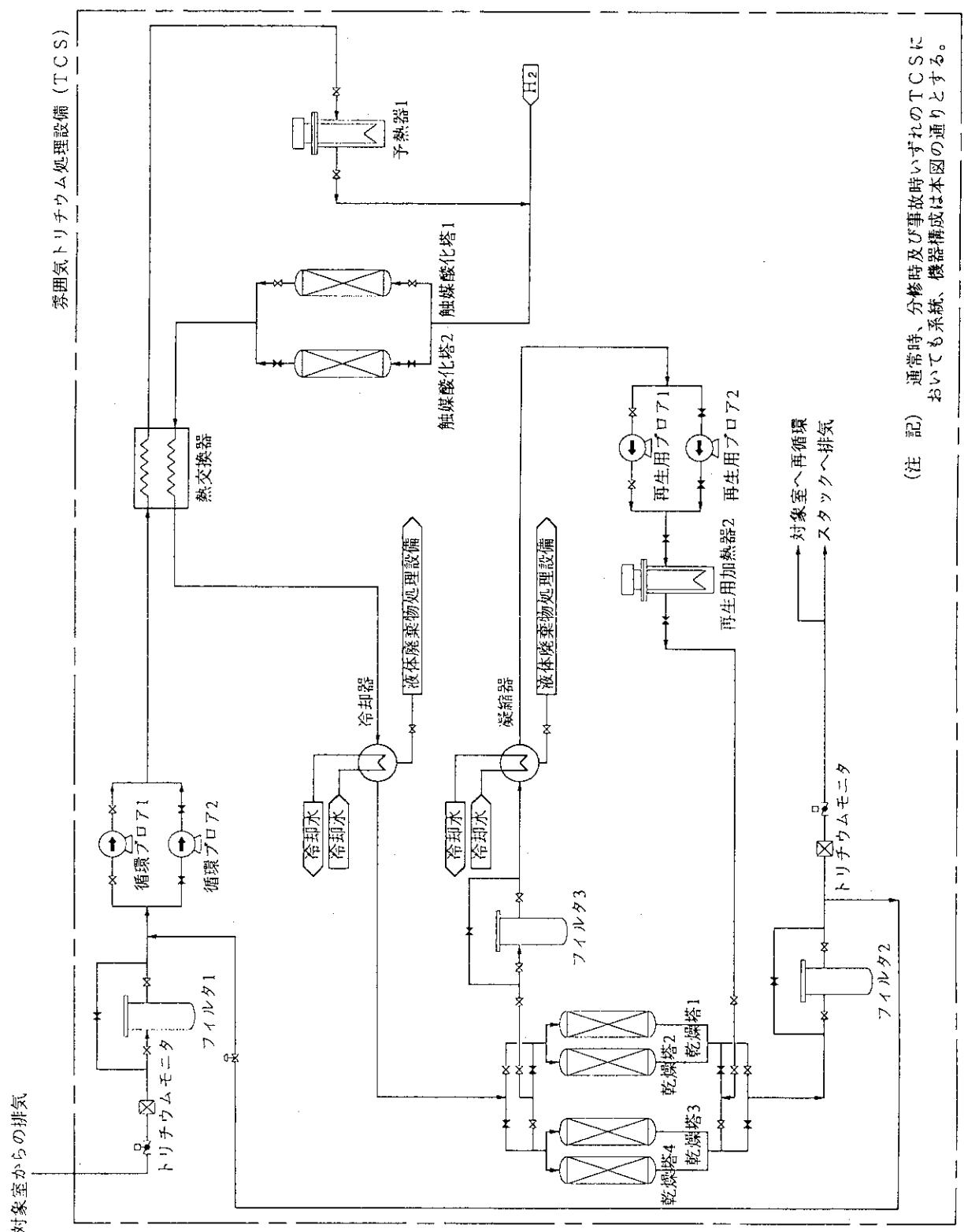


図5.2 FER炉建家用トリチウム安全系の系統構成



(注記) 通常時、分修時及び事故時のTCSにおいても系統、機器構成は本図の通りとする。

図5.3 FERトリチウム安全系における基本フローシート

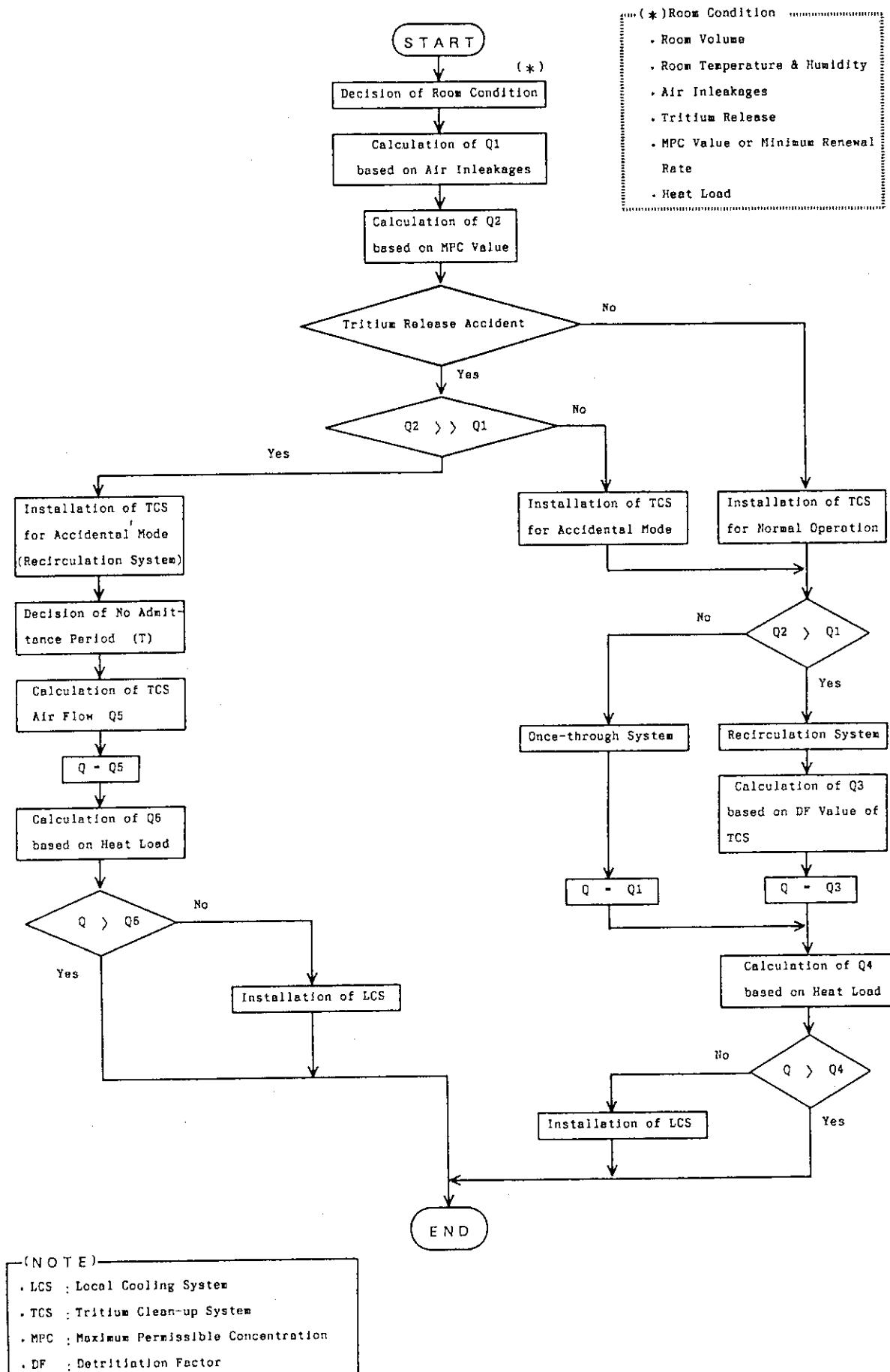


図5.4 F E R炉建家トリチウム安全系の運転制御モード

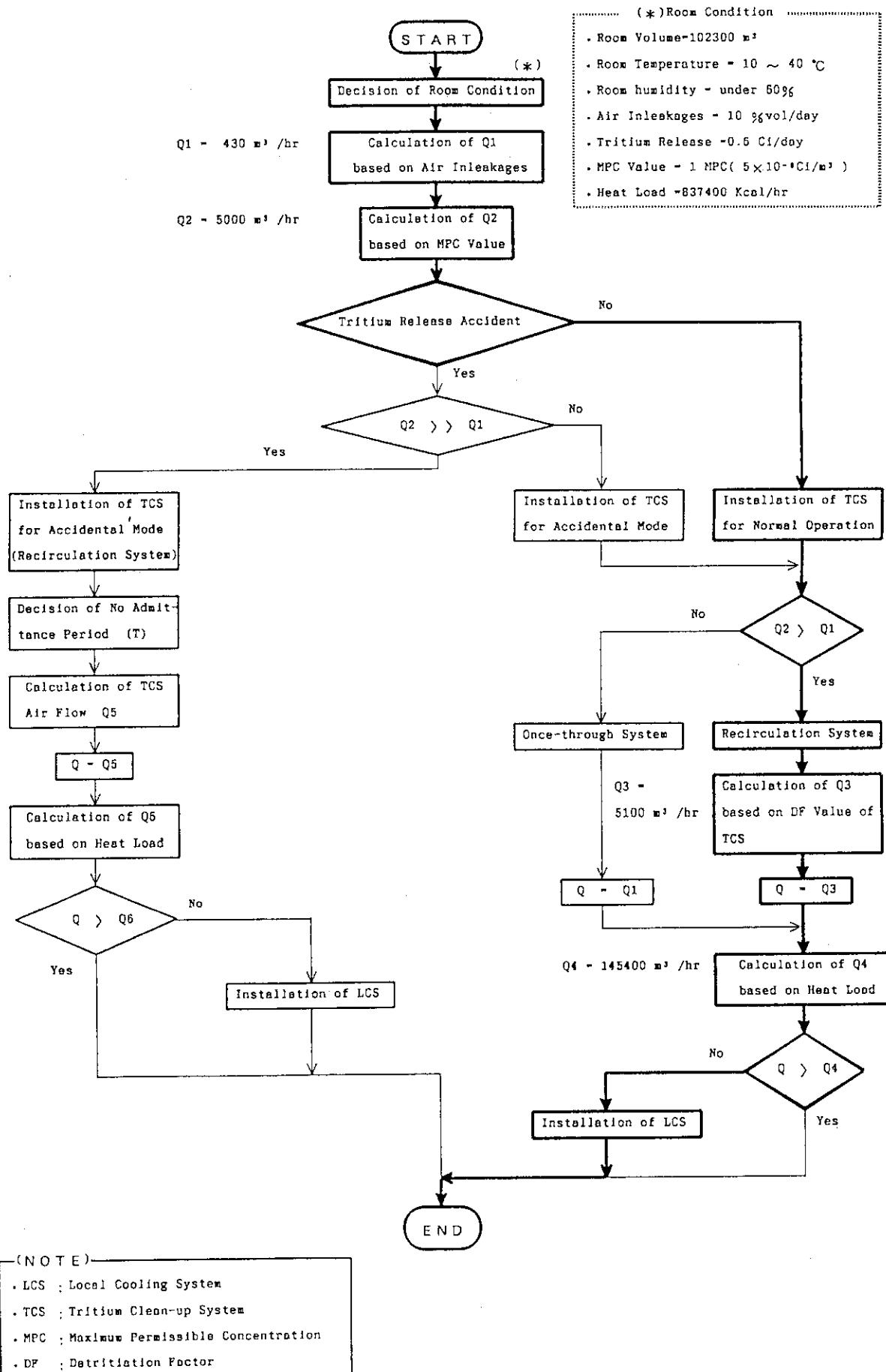
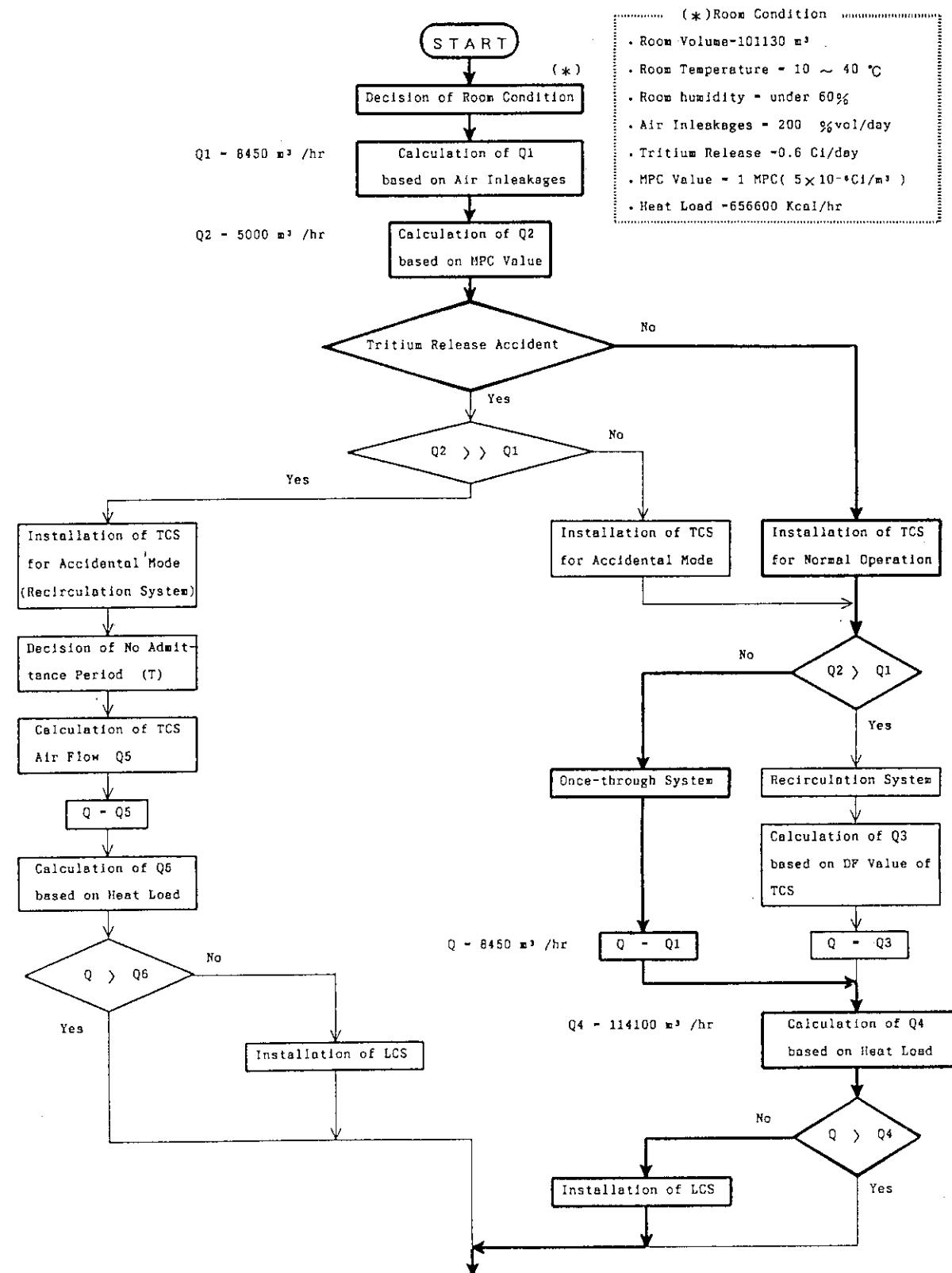


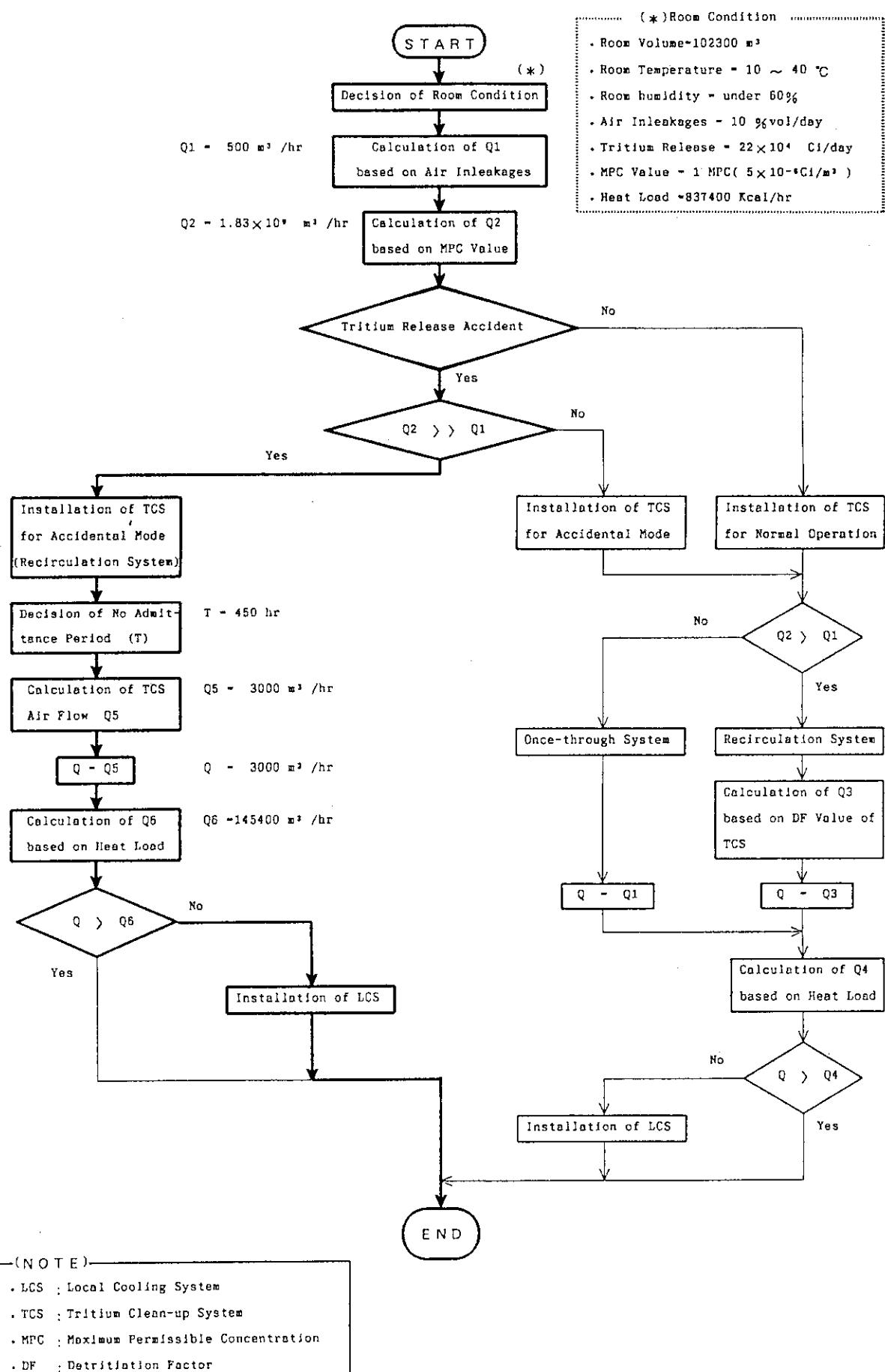
図 5.5 通常時用 TCS 系の運転制御（例）：クレーンホール



(NOTE)

- LCS : Local Cooling System
- TCS : Tritium Clean-up System
- MPC : Maximum Permissible Concentration
- DF : Detritiation Factor

図5.6 通常時用TCS系の運転制御(例)：NBI設備室

図5.7 事故時用TCS系の運転制御(例) : クレーンホール, 22g-T₂放出

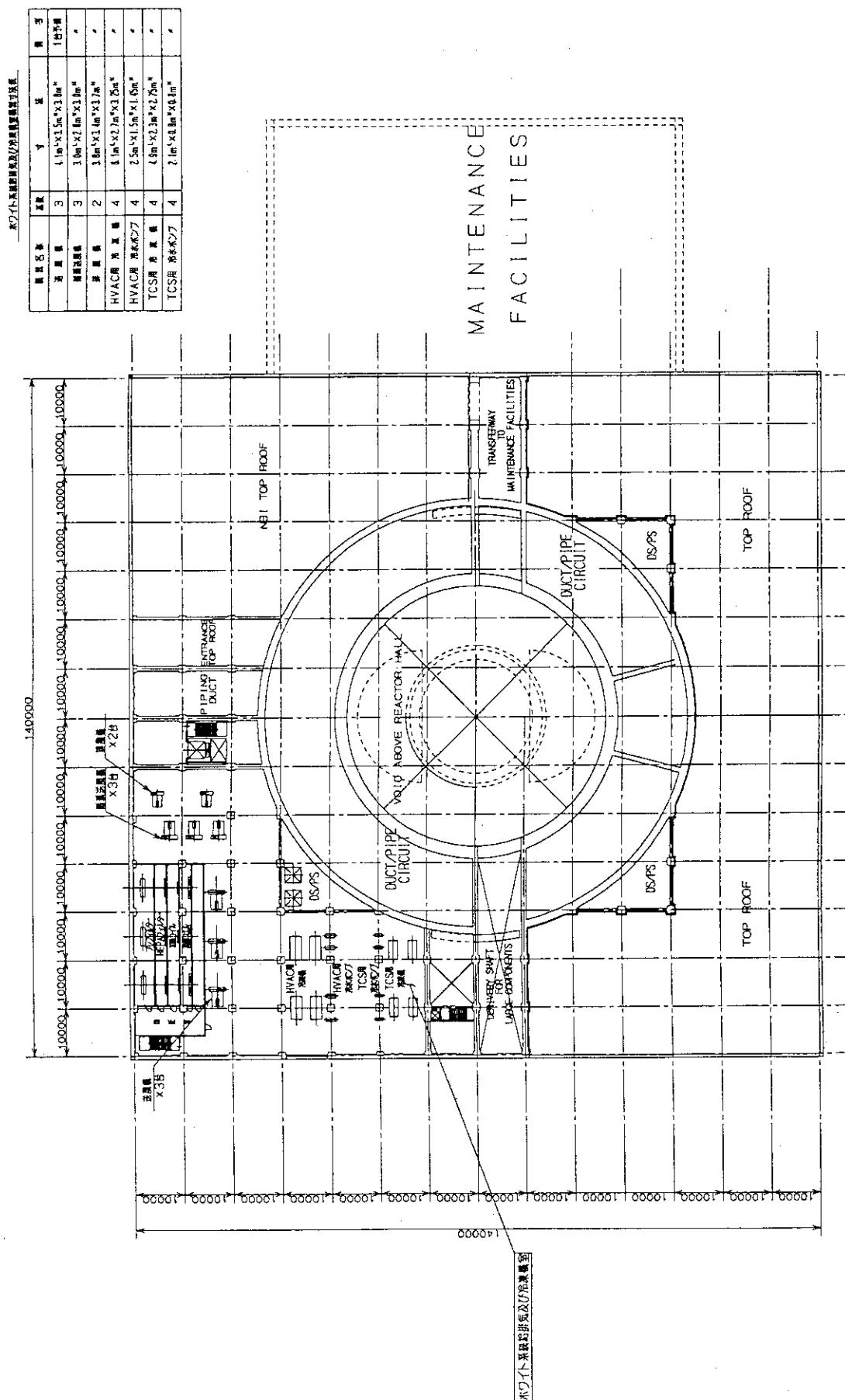


図5.8 FER機器配置図（2階平面図）図5-8

レフ・アンバー・クリーンルーム配置図

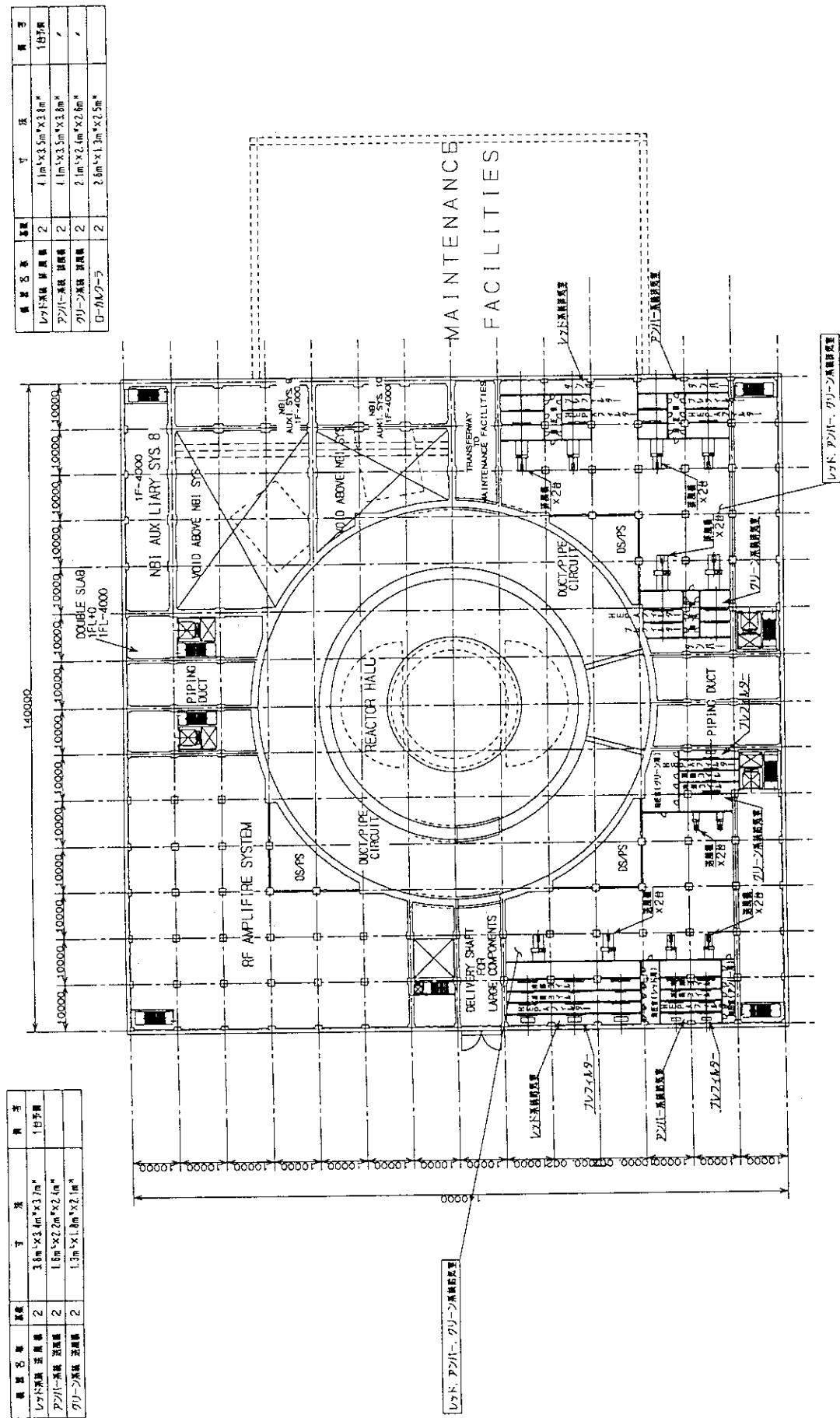


図5.9 FER機器配置図（1階平面図）図5-9

通常時TCS 機器寸法表(注)基部は1系統分を記載)

番号	機器名	基部	寸法	備考
1	フィルター	4	1.0'x2.5"	
2	清涼フロア	2	3.5'x4.1'x2.0"	
3	取扱工具	1	4'x1.5'x1.0"	(2席)
4	手荷物	9	60Kg×2.6t	
5	搬送機器	2	3.0'x2.0"	
6	冷蔵庫	1	2.0'x1.5'	
7	更衣室	1	2.0'x4.0'	
8	再生用フロア	2	2.5'x3.0'x1.4"	
9	再生用工具	9	60Kg×2.6t	
10	乾燥室	4	3.0'x3.0"	
11	口-ガラリ	1	1.7'x1.3'x1.0"	3段階分1個

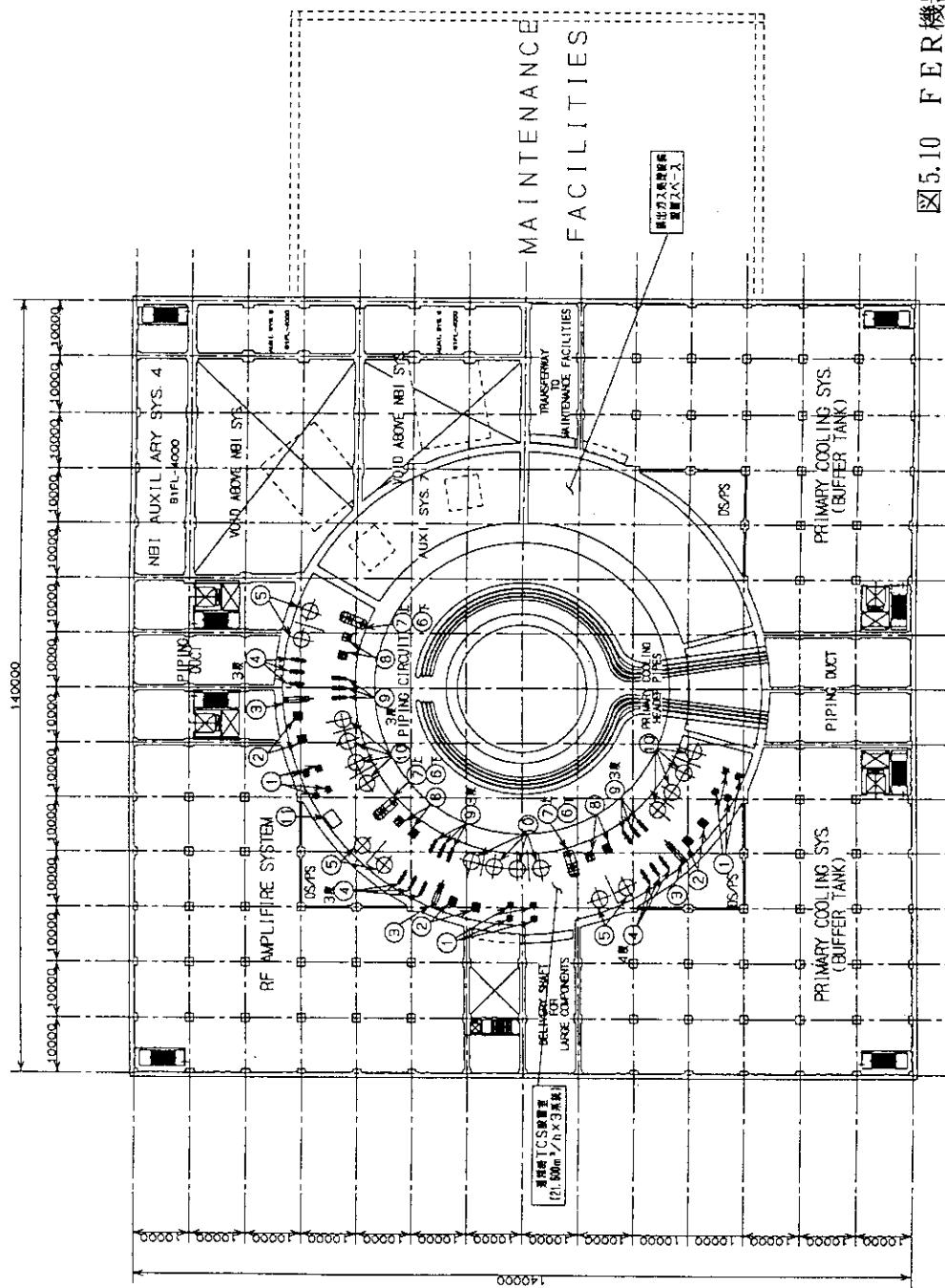


図5.10 FER機器配置図（地下1階平面図）図5-10

分野別 TCS & 住専 TCS 設置可否表

分野名	規格	分野別 TCS		専用 TCS (30m ³ /h)		専用 TCS (50m ³ /h)	
		規格	寸法	規格	寸法	規格	寸法
1 施工工事	2	1.0m×2.5m	1	1.0m×2.3m	1	0.5m×1.5m	
2 通風/ODP	2	2.2m×3.1m×1.6m	2	2.0m×1.5m×1.0m	2	1.6m×0.9m×0.6m	
3 間伐機器	1	1.5m×0.8m×3.5m	1	1.0m×1.0m×2.75m	1	0.5m×0.5m×1.0m	
4 木造	5	5.0m×2.5m	2	5.0m×2.5m	1	5.0m×2.4m	
5 通風/DCS	2	2.0m×2.0m	2	1.0m×1.0m	2	0.5m×0.5m	
6 運搬	1	1.8m×3.5m	1	1.2m×2.5m	1	0.6m×2.0m	
7 木造	1	1.5m×3.5m	1	1.0m×2.5m	1	0.5m×2.0m	
8 木造ODP	2	1.5m×2.5m×1.7m	2	1.0m×1.7m×1.5m	2	0.5m×2.0m	
9 木造加工作業	5	5.0m×2.5m	2	5.0m×2.5m	1	5.0m×2.4m	
10 木造	4	2.0m×2.0m	4	1.0m×1.0m	4	0.5m×0.5m	

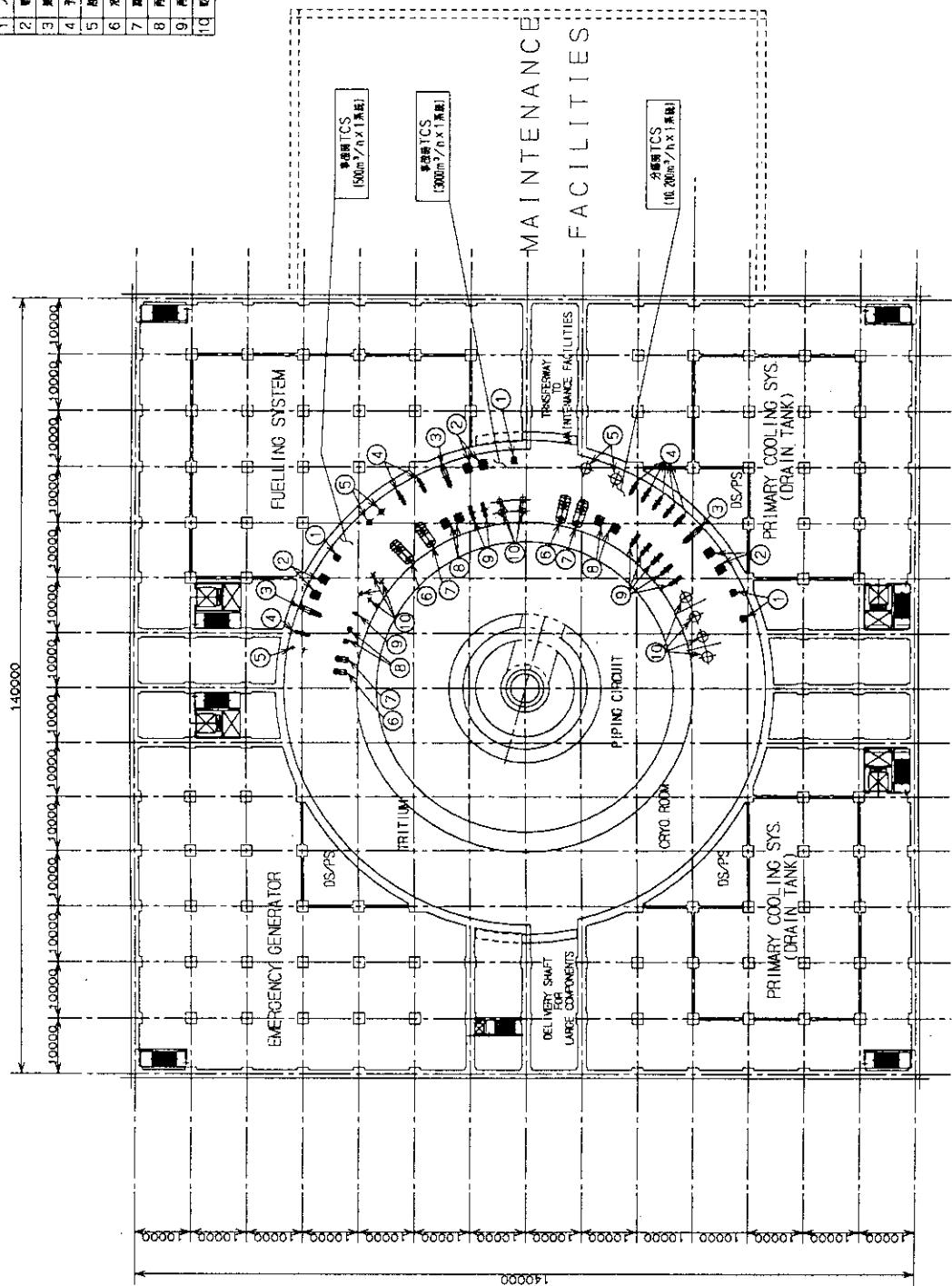


図5.11 FER機器配置図（地下4階平面図）図5-11

6. 補足検討

6.1 事故時用 TCS 所要換気風量と運転時間

(1) 計算モデル

(i) 流量バランス

トリチウム放出事故発生室、TCS系及びスタック相互の風量バランスを図6.1に示す。トリチウム(T_2 ガス)を含む室内空気はTCS-1(処理風量 W_1 、除染係数 DF_1)で処理された後、再循環($W_1 - W_2$)される。ただし、当該室の負圧を維持するため、建家気密度に応じて室内に漏れ込む空気量(W_2)と同等量をTCS-2(処理風量 W_2 、除染係数 DF_2)を経て(あるいはバイパスして)環境に排出する。TCS-2は、高除染が必要な場合のバックアップである。

(ii) 混合モデル^{(20), (21)}

(イ) T_2 ガスは室内に放出された瞬間に室内均一に分散され、かつTCS-1入口濃度が室内霧囲気濃度と等しいとする。

すなわち、

(ロ) 室内霧囲気中のトリチウムの流れにおいて、バイパス流、内部循環流、よどみ・十字流(交換はあるが流れが起こらない)等の流れは無いものとする。

(ハ) 放射線等の作用による空气中酸素との反応($T_2 + 1/2 O_2 \rightarrow T_2O$)及び水分との同位体交換反応($H_2O + T_2 \rightarrow HTO + HT$)は考慮しないものとする。

(ニ) 部屋の床、壁、天井及び機器類の表面と霧囲気トリチウムとの相互作用(吸着、脱着)は考慮しないものとする。

(2) 計算式

霧囲気トリチウム濃度の時間変化は次式で表される。

$$V \frac{dC_t}{dt} = \frac{C}{DF_1} (W_1 - W_2) - CW_1 \quad \dots \quad (1)$$

$t = 0$ におけるトリチウム濃度は、 $t = 0$ において、 $C_t = \frac{A_0}{V}$ 。

したがって、(1)式の解は

$$C_t = \frac{A_0}{V} \exp \left[\frac{\left\{ (W_1 - W_2) \frac{1}{DF_1} - W_1 \right\} t}{V} \right] \quad \dots \quad (2)$$

(2)式より、トリチウム放出事故後、霧囲気トリチウム濃度を許容濃度 C_p (Ci/m³)まで低減するのに要する時間 t_p (h)は、

$$t_p = \frac{V}{W_1 \left(\frac{1}{DF_1} - 1 \right) - \frac{w_2}{DF_1}} \ln \frac{C_p V}{A_0} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

時刻 t_p までにスタックを経て環境中に放出されるトリチウムの総量 $A_{\text{ex}}(\text{Ci})$ は、次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 A_{ex} &= \frac{1}{DF_1 \cdot DF_2} \int_0^{t_p} W_2 C_t dt \\
 &= \frac{\alpha A_0}{\beta DF_1 DF_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{\beta W_1}{V} t_p \right) \right] \\
 \alpha &= \frac{W_1}{W_s}, \quad \beta = 1 - \frac{1}{DF_1} (1 - \alpha) \quad \dots \dots \dots \quad (4)
 \end{aligned}$$

二二〇

$t_p \rightarrow \infty$ とすると、トリチウムの総放出量 $A_{\text{ex}}(\infty)$ (Ci) は、

$$A_{ex}(\infty) = \lim_{t_n \rightarrow \infty} A_{ex} = \frac{\alpha A_0}{\beta DF_1 \cdot DF_2} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

以上の各式に次の各値を代入する。

部屋の容積: $V = 102300\text{m}^3$

部屋への空気漏れ込み量 : $W_2 = 500 \text{m}^3/\text{h}$

(建家氣密度10vol%／d相當)

事故時トリチウム放出量: $A_0 = 2.2 \times 10^5$ (Ci)

TCSのトリチウム除去性能: $DF_1 = DF_2 = 100(-)$

(3) 計算結果

第一段霧囲気浄化設備（TCS-1）の所要風量 W_1 をパラメータとした場合の室内トリチウム許容濃度の達成時間及びスタック放出量を表6.1及び図6.2に示す。

第5章のTCS設計において採用した処理風量 $3000\text{m}^3/\text{h}$ （換気回数 0.0293h^{-1} ）では、 1MPCa ($5 \times 10^{-6}\text{Ci/cm}^3$) 達成までの所要時間は437hであり、スタックからのトリチウムの総放出量は3.70 Ciとなる。

6.2 霧開気トリチウム浄化設備からのトリチウムの廃液発生量

6.2.1 通常時用TCS廃液量及び分解修理時用TCS廃液量

(1) 計算条件

(i) 両TCSの運転モードは図6.3に示すように循環運転とし、排気風量はインリークを含む給気量に等しいとする。TCS出口の水分濃度は1vppm以下（露点で約-70°C）に保持されるが、ここでは湿分0%とする。

- (ii) TCSへのH₂ガススワンピング又は水蒸気スワンピングは行なわないものとする。
- (iii) 乾燥塔入口に設置されている冷水冷却器(出口温度5°Cにおける空気中の飽和湿度0.0054 kgH₂O/kg-乾燥空気)からの凝縮水もTCS廃液とする。
- (iv) TCS処理対象室への給気条件は、給気設備の冷却コイル出口条件(20°C, 飽和状態)とする。ただし、給気量の少ないライニング施工室への給気については、外気条件(32.9°C, 相対湿度57%)とする。
- (v) TCS処理対象室においては空気中の湿分以外に水の発生源が無いものとする。
- (vi) 分解修理時用TCSは、同時に2室(トリチウム廃液発生量が最大となる室)を浄化処理するものとする。

(2) 計算式

$$\text{給気量 } Q = V \left(L / 100 \right) \left(1 / 24 \right)$$

$$\text{廃液発生量 } W = Q \left(24 \right) \left(X / v \right)$$

Q : 給気量 (m³/h)

V : 室容積 (m³)

L : 室別漏洩量 (vol%/d)

ライニング施工室 ; L = 10 vol%/d

非ライニング施工室 ; L = 100 vol%/d

W : トリチウム廃液発生量 (kg/d)

X : 給気の絶対湿度 (kg/kg-乾燥空気)

v : 給気の比容積 (m³/kg-空気)

20°C, 飽和状態では,

X = 0.0146 kg/kg-乾燥空気,

v = 0.850 m³/kg-空気,

32.9°C, 57%では,

X = 0.0179 kg/kg-乾燥空気,

v = 0.892 m³/kg-空気,

(3) 計算結果

室別のトリチウム廃液発生量を表6.2に示す。通常時TCS(処理対象室; 12室)からの廃液発生量は14.7 m³/dと膨大な量であり、そのトリチウム濃度(0.49 Ci/m³)は法規制値(事業所境界の排水の濃度限度; 3月間の平均濃度60 Bq/cm³)の約300倍であることから、トリチウム廃液の濃縮、減容処理が必要となる。本処理設備は、図6.4に示すように大規模な同位体分離設備(水蒸留塔: 3.1 m^{1D} × 30 m^H/2基, 1.2 m^{1D} × 13 m^H/1基)であり、実験炉建家とは独立の建家が必要と考えられる。本設備設計の詳細については、稿を改めて報告する予定である。

本計算結果より、核融合実験炉建家からのトリチウム廃液発生量を低減化するには、実験炉設計段階において次のような事項を考慮する必要のあることが分かる。

- (i) NBI関連設備室や一次冷却水関連設備室のように室容積の大きい部屋における各設備

のトリチウム漏洩量を極力低減し、通常換気（ワンススルー運転）とする。ただし、トリチウム漏洩事故時に備えて換気系の切り換えによるTCS運転が可能なように考慮する。

(ii) 上記の各室においてトリチウムの発生が避けられない場合には、トリチウム廃液処理設備の小型化(1/20規模)を図るために、各室の気密度を本設計検討で採用した値(200vol%/d)の1/20程度に高める。

6.2.2 事故時用TCS廃液量

本TCSは、22gのトリチウムガス(T_2)がクレーンホール(クレーンホール:容積102300m³, 室気密度10vol%)に放出された場合を想定し、約3週間で人が防護具を着用せずに室内に立ち入ることのできる濃度($1\text{MPCa} = 5 \times 10^{-6}\text{Ci/m}^3 = 1.85 \times 10^{-1}\text{Bq/cm}^3$)まで雰囲気浄化する能力を備えたものである。

6.1節(事故時TCSの所要換気風量と運転時間)の検討結果(循環風量2500m³/h, 排気風量500m³/h, 運転時間437h)より、トリチウム廃液量は4385kg*1となる。

$$\ast 1 \frac{500(\text{m}^3/\text{h}) \times 0.0179(\text{kg/kg-H}_2\text{O})}{0.892(\text{m}^3/\text{kg-H}_2\text{O})} \times 437(\text{h})$$

6.3 TCS廃液中のトリチウム濃度

(1) 通常時用TCSからの廃液濃度

本設計検討では、通常時用TCS処理対象とした以下の各室におけるトリチウム発生量を0.6Ci/dと仮定している; クレーンホール(クレーンホール), 主排気ポンプ室, 燃料系設備室, NBI関連設備室(ビームダンプ室, イオン源室, 附属設備室, エントランス), 一次冷却設備(主ヘッダエリア, バッファタンク室, 熱交換器室, 排水貯槽室), トリチウム処理設備室(TCS室, TWT室)。

通常時用TCSからのトリチウム廃液の発生量は、14704kg/dである(表6.2)。したがって、廃液中のトリチウム濃度は、 $4.90 \times 10^{-4}\text{Ci/kg-H}_2\text{O}$ となる。

(2) 分解修理時用TCSからの廃液濃度

本設備からのトリチウム廃液発生量は182kg/d(表6.2)であり、トリチウム発生量は(0.6Ci/d)(2室)と仮定している。したがって、廃液濃度は $6.6 \times 10^{-3}\text{Ci/kg-H}_2\text{O}$ となる。

(3) 事故時用TCSからの廃液濃度

6.1節(事故時用TCSの所要換気風量と運転時間)の検討結果(循環風量2500m³/h, 排気風量500m³/h, 運転時間437h)より、廃液濃度は50.2Ci/kg-H₂Oとなる。

6.4 HVAC系及びTCS系からの排気トリチウム濃度

(1) HVAC(レッド)系からの排気濃度

この換気空調系（総排気風量 $118330\text{m}^3/\text{h}$ ）は、通常時（分解修理時を除く）にはトリチウムの発生がないか、若しくはトリチウムの発生量が非常に少ない設備室（及び区域）を処理対象にしている。本設計検討では、地下階B F 4のトリチウム処理設備室（クレーンホール事故時用TCS及び分解修理時用TCS系を設置）においてのみ $6 \times 10^{-3}\text{Ci}/\text{d}$ のトリチウム発生があると仮定している。したがって、排気中のトリチウム濃度は $2.11 \times 10^{-8}\text{Ci}/\text{m}^3$ となる。

(2) 通常時用TCS系からの排気濃度

本検討では、通常時用TCSが対象とする各室で $0.6\text{Ci}/\text{d}$ のトリチウム発生量があるとし、室内空気中濃度を 1MPCa ($= 5 \times 10^{-6}\text{Ci}/\text{m}^3$)以下に維持できるものとしている。また、TCS系の除染係数は100としている。

本TCSからのトリチウム排出量は、レッドゾーンからの $3.69 \times 10^{-2}\text{Ci}/\text{d}$ とアンバー／ゾーンからの $1.63 \times 10^{-3}\text{Ci}/\text{d}$ の和 $3.86 \times 10^{-2}\text{Ci}/\text{d}$ （表5.8）である。排気風量は、両ゾーンにおける各室の漏洩空気量の総和 $35590\text{m}^3/\text{h}$ （表5.7, 5.8）であるから、排気濃度は $4.52 \times 10^{-8}\text{Ci}/\text{m}^3$ となる。

(3) 分解修理時用TCS系からの排気濃度

本検討では、分解修理に伴ってトリチウムが発生する可能性のあるレッドゾーン内の室、区域を9箇所とし、同時に2室（区域）での分解修理作業が行えるものとしている。各室での漏洩空気量が最も大きい2室において、それぞれ $0.6\text{Ci}/\text{d}$ のトリチウム発生があることを想定した場合のトリチウム排出量と排気風量は $5.28 \times 10^{-4}\text{Ci}/\text{d}$, $440\text{m}^3/\text{h}$ となる（表5.6）。したがって、排気濃度は $5 \times 10^{-8}\text{Ci}/\text{m}^3$ となる。

(4) 事故時用TCS系からの排気濃度

6.1節に示すように、 22g の T_2 がクレーンホール内に放出された際のTCS系の運転時間は 437h 、排気風量は $500\text{m}^3/\text{h}$ 、排出トリチウム量は 3.7Ci である。

したがって、排気濃度の平均値は $1.69 \times 10^{-5}\text{Ci}/\text{m}^3$ となる。

6.5 HVAC系及びTCS系からの放射性固体廃棄物の発生量

(1) HVAC系

本設備については年1回の定期検査を行なうとし、その際にプレフィルタとHEPAフィルタが交換されると仮定した場合の放射性廃棄物量を表6.3に示す。これらの廃棄物は、グリーン、アンバー及びレッドゾーン用排気系統から発生するものであり、トリチウム汚染レベルは極めて低いと考えられる。

(2) 通常時用TCS系

本設備は常時稼動設備であるので、HVAC系と同様に年1回の定期検査を行なうものとし、触媒酸化塔の触媒（Pd添着アルミナ）と乾燥塔の吸着材（モレキュラーシーブ）、及びフィルタ類（ここではHEPAフィルタとする）が交換されると仮定した場合の廃棄物量を表6.4に示す。触媒酸化／吸着プロセスにより構成されるTCS系では、触媒や吸着材の交換頻度に係わる次のような要因があるが、本検討では考慮していない。

(i) Pd添着アルミナ触媒

この触媒は、ハロゲン化物、硫化物、金属蒸気等による被毒が起こらない場合には、極めて長期間使用可能であることが分かっている。例えば、米国のT S T Aでは約10年間、原研のT P Lでは約5年間、触媒性能の劣化を原因とする触媒の交換は経験していないようである。

(ii) 吸着材

モレキュラーシーブは、オイル蒸気等の不純物の吸着や非常に多数回の再生操作によってトリチウム水蒸気に対する吸着性能が劣化する可能性がある。

(3) 分解修理時用及び事故時用T C S

これらの設備は、稼動頻度が小さいかあるいは延べ運転時間が短いので、通常時用T C S系のような頻度（1回／年）の定期交換は不要と考えられる。表6.4には、1回の交換当たりの廃棄物量を示した。

6.6 一次冷却水漏洩の低減化の必要性

(1) 核融合実験炉の場合

本設計検討で取り上げている一次冷却水設備は第一壁、ダイバータ及び遮蔽体を冷却する設備であり、それぞれの冷却水には炉心からのトリチウムが侵入する。レッドゾーン内に配置した関連設備室（バファタンク室、熱交換器室、主ヘッダーエリア）は室容積が大きいことから、雰囲気トリチウム浄化に伴うトリチウム廃液の発生量は膨大であり、通常時用T C Sで発生するトリチウム廃液（1470kg/d）の54%を占める。（表6.2）。一次冷却設備のバルブ、ポンプ、配管接続部等からの冷却水漏洩を極力抑えてトリチウム発生を低減化することが可能であれば、当該区域を通常の換気空調設備で処理することができる。この場合、少なくとも以下の条件が満たされねばならない。

(i) トリチウム侵入量は、プラズマに対向する冷却面の構成材料、温度条件、表面積により異なる。一次冷却設備からのトリチウム漏洩量を低減するためには、一次冷却水トリチウム除去設備を設置し、冷却水中のトリチウム濃度をできるかぎり低く抑える必要がある。（ITERでは0.1Ci/kg-水以下）。

(ii) 室内空気中のトリチウム水濃度限度（表2.12： $2.1 \times 10^{-1} \text{Bq/cm}^3$ ）及び敷地境界の空気中の放射性同位元素の濃度限度（表2.14：トリチウム水のみの場合で、3月間平均で 60Bq/cm^3 ）を満足しなければならない。さらに、排出トリチウムの総量規制値が設定される場合の考慮も必要である。

(iii) ポンプ、バルブ、配管接続部、塔槽類からの水の漏洩を極力少なくする。例えば、加圧水型原子炉施設の一次冷却水設備^{*1}では、大口径のポンプやバルブのように無漏洩化の困難な機器について、局所格納・ページ、局所排水等の対策（リーク・オフ・ライン）が考慮されているようである。

* 1：「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針について」（昭和51年、

原子力委員会) ⁽¹⁹⁾

(2) 加圧水型原子炉 (PWR) の場合

PWRでは、炉心の燃料被覆管に生じた微小の損傷を通じて、燃料中の希ガス及びよう素が一次冷却材中に混入する。したがって、一次冷却系のポンプ、バルブ等の機器から漏洩した冷却材中の放射性ガスの一部は建家内雰囲気中に移行し、換気系を経て環境に放出される。このため、前記の「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針について」では、一次冷却材漏洩率を定めている。以下では、核融合実験炉の一次冷却水系、換気系、雰囲気浄化系に関する今後の設計に資するために、漏洩率算定の根拠をやや詳しく説明する。

(i) 原子炉の運転中の原子炉格納容器内 : 0.1トン／d

一次冷却材が 100%出力運転時の温度、圧力の状態で漏洩し、かつ冷却材中のような素が雰囲気中に 0.1の割合で移行するものとする。よう素の移行割合は、冷却材の漏洩時の蒸発率を35%，100 °Cにおける蒸気－水の容積比1700，常温におけるよう素の気液分配係数を 10^{-4} として定めたものである。

(ii) 原子炉補助建家内 : 0.08トン／d

原子炉補助建家内の機器及び配管中の一次冷却材量の低温と高温との比率(20:1)を考慮し、低温冷却材が80リットル／d、高温冷却材が4リットル／d漏洩すると仮定して定めたものである。建家内雰囲気中へのよう素の移行割合は、漏洩時の蒸発率を低温及び高温漏洩についてそれぞれ1%，35%とすると0.005となる。

6.7 触媒酸化塔及び乾燥塔の設計計算方 ^{(20) - (24)}

(1) 触媒酸化塔

ここでは、通常時用TCS系の酸化塔の設計例を示す。

(i) 反応速度に基づく理論触媒量

反応塔内の反応物質が、ちょうどピストンの動きのように、流れと直角方向に一樣の速度でしかも流れの方向に混合も拡散もなく層内を移動するとしたとき、入口、出口の流れの反応物質の濃度は次式で表される。

$$C_{out}/C_{in} = \exp(-k \cdot V c/Q) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 Vc は理論所要触媒量(m^3)、 Q は反応塔内のガス体積流量(m^3/s)、 k は反応速度($m^3/s \cdot m^3$ －触媒)である。

トリチウムガス(H₂-T₂)の酸化反応についてはBixelとKershnerが次の実験式を報告している⁽²⁵⁾。

$$k = 2.27 \times 10^5 \exp(-7100/RT) m^3/s \cdot m^3 - \text{触媒} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

R ; 気体定数 (= 1.987 cal/g-mol · K)

Bixel らの実験では、酸化塔入口ガスはH₂-T₂混合ガス(混合比H/T=25/1、H-Tガス圧力=0.5ppm)であり、トリチウム濃度は $110 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4} Ci/m^3$ である。触媒

温度 177°Cにおける転換率 α は、0.999以上である。

一方、D₂ガスを用いた吉田ら同様の実験では、触媒温度と転換率の関係が測定されており、100°Cで0.9999以上の転換率が得られることを実証している⁽²⁶⁾。

C_{out}/C_{in} を T_2 ガスの転換率 α 及び転換係数 CF で表すと、

$$\alpha = 1 - C_{\text{out}}/C_{\text{in}}, \quad \text{CF} = C_{\text{in}}/C_{\text{out}} = 1/(1 - \alpha) \quad \dots \quad (3)$$

(1), (3)式より,

$$V_c = Q/\varepsilon \cdot k \ln CF \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ただし、 ε は触媒充填層の空隙率である。

通常時用 T C S 系の酸化塔設計条件は次のとおりである；

處理風量 $Q_0 = 10800 \text{m}^3/\text{h}$

酸化塔内ガス圧力 $P = 1.4 \text{ kgf/cm}^2$

触媒温度 T = 473K

触媒充填層の空隙率 $\varepsilon = 0.3$

図6.5は、(4)式より求めたT₂ガス転換係数CFと理論触媒量V_Cの関係を示すものである。空気中の極めて稀薄なT₂ガス（通常時用TCS系が対象とするトリチウム濃度は許容空气中濃度レベル $5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ ）に対する転換係数の精密な実測値はほとんど報告されていない。触媒温度200°Cとし、CF=10⁶が達成できるもとすると、V_C=0.57(m^3)となる。所要触媒量は、反応塔内における処理ガス流量や触媒温度の変動を考慮してV_Cの2~4倍(1.2~2.4 m^3)程度とされる。

(ii) 触媒空間速度SVに基づく触媒量V_c

触媒反応器の設計において、反応速度 k の代わりに処理ガス流量 (m^3/h) と触媒量 (m^3) の比で表される触媒空間速度 $SV(h^{-1})$ を用いて触媒量 V_s を求めることができる。この方法は、正確な反応速度が分かっていない反応系の設計において実用的に行なわれるものである。

DEOXO触媒等の適切に設計されたトリチウム酸化を用いた場合、 10^3 以上の転換係数CFを達成できるSVの値は、 $3000-5000\text{h}^{-1}$ であることが実証されている（原研T P Lのグローボックス
雰囲気浄化用酸化塔）。したがって、酸化塔の所要触媒量V_sは、

$S V = 3000 \text{ h}^{-1}$ のとき、 $V_s = 4.2 \text{ m}^3$

$S V = 5000 \text{ h}^{-1}$ のとき、 $V_s = 2.5 \text{ m}^3$

(iii) 空塔速度に基づく触媒量 V_t

触媒反応器の簡単な設計法として次の計算法も用いられる。

充填層内における反応時間を十分にとるため塔内の平均ガス粒速 u (m/s)と反応器直径 D との間でつぎの条件が設定される。

$$u = \frac{4Q}{D^2\pi} < 1 \text{m/s}$$

触媒層高Z (m)は、層内での偏流を避けるため、通常次のように設定する。

$$Z > 100d_p$$

d_p (m) は触媒の相当直径であり、直徑と高さが等しい円筒形状1/8インチペレットの場合、

$$d_p = 3.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

通常時用 T C S 酸化塔の体積ガス流速は、 $Q = 3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ であるから、

$$D > 2.1 \text{ m},$$

$$Z > 0.32 \text{ m},$$

$$V_t > 1.1 \text{ m}^3$$

となる。

以上の計算結果をまとめると、

$$V_c = 1.2 - 2.4 \text{ m}^3$$

$$V_s = 2.5 - 4.2 \text{ m}^3$$

$$V_t > 1.1 \text{ m}^3$$

本設計では、安全側の設計となる最大値 4.2 m^3 を採用した。(iii) の結果に基づき、塔直徑を $D = 2 \text{ m}$ とすると充填層高は $Z = 1.3 \text{ m}$ となる。

(iv) 触媒充填層における圧力損失

充填層の圧力損失を計算する式は幾つか知られているが、ここでは流れのレイノルズ数を層流-乱流の範囲で広く取り扱う次のErgunの式を用いる。

$$\frac{\Delta P}{Z} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g u^2}{\phi_s d_p} \quad \dots \quad (1)$$

ここで ΔP は圧力損失 (kg/m^2)、 Φ_s は触媒粒子の形状係数(=)、 ρ_g はガスの密度(kg/m^3)、 μ はガスの粘性係数 ($\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)である。

触媒が球形でないときの粒子直徑 d_p と形状係数 Φ_s は、粒子1個の体積 V_p 、外表面積を a_p で表すと、次式より求められる。

$$d_p = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad \dots \quad (2)$$

$$\Phi_s = \left(\frac{\pi}{a_p} \right) \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{2/3} \quad \dots \quad (3)$$

Φ_s 、 d_p を d_p' で表すと、 $d_p' = \Phi_s d_p = \sigma V_p/a_p$

また、球形粒子では $\Phi_s = 1$ 、直徑と高さが等しい円筒形粒子では $\Phi_s = 0.874$ 、その他の多くの粒子では $\Phi_s = 0.55 - 0.86$ である。

酸化塔設計条件 (温度 200°C 、圧力 $1.4 \text{ kg}/\text{cm}^2$)、触媒形状1/8インチペレット) より、

$$\rho_g = 1.012 \text{ kg}/\text{m}^3,$$

$$\mu = 2.64 \times 10^{-6} \text{ kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 0.3 \\ d_p &= 3.2 \times 10^{-3} \text{m} \\ \Phi_s &= 0.874\end{aligned}$$

これらの値を(1)式に代入すると、次のように単位長さ当たりの圧力損失が空塔速度の2乗に比例して増加することが分かる。

$$\begin{aligned}\Delta P/Z &= 8.99 \times 10^3 u \\ &\quad + 16.37 \times 10^3 u^2 [\text{Pa/m}]\end{aligned}$$

上記計算結果（酸化塔直径D = 2 m, 触媒充填層高Z = 1.3 m, 体積流量Q = 3.46 m³/s）より、本酸化塔の圧力損失は $\Delta P = 38.7 \times 10^3 \text{ Pa}$ となる。

(2) 乾燥塔

トリチウムを取り扱う施設では、モレキュラーシーブ等の多孔質吸着材を充填した乾燥塔による雰囲気トリチウム(HTO, T₂O)の吸着除去が行なわれている。この乾燥塔の設計には、通常の充填層吸着装置の設計法が適用されている。モレキュラーシーブにおける水分吸着が直線平衡系であることから、ここでは、次のRosenの解法⁽²⁰⁾に基づく機器設計を試みる。

(i) 総括物質移動容量係数 K_{Fav} (s^{-1}) の算出

$$\frac{1}{K_{Fav}} = \frac{1}{K_F a_v} + \frac{1}{\beta k_S a_v} \quad \dots \quad (1)$$

式の右辺の第1項、第2項はそれぞれ吸着材粒子、流体界面における境膜拡散抵抗(s^{-1})、粒子内拡散抵抗(s^{-1})を表す。 a_v は充填層単位体積中の粒子表面積($m^2 \cdot m^{-3}$)であり、粒子直径d(m)、充填層の空隙率 ε (-)を用いて次のように求められる。

$$a_v = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \quad \dots \quad (2)$$

k_F は流体境膜物質移動係数であり、Chuらの推算式⁽²⁰⁾で計算される。

$$\begin{aligned}\frac{k_F}{u} \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right) &= 1.77 \left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{-0.44} : 30 < \frac{Re}{1-\varepsilon} \\ &= 5.70 \left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{-0.78} : 30 > \frac{Re}{1-\varepsilon} \quad \dots \quad (3)\end{aligned}$$

u はガスの空塔速度($m \cdot s^{-1}$)、 ρ はガスの密度($kg \cdot m^{-3}$)、 μ はガスの粘性係数($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)、 Re はレイノルズ数(--)である。

また、次式における β は直線平衡系の吸着係数($m^3 \cdot kg^{-1}$)であった、 k_{Sav} は粒内物質移動容量係数($kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$)である。

$$\beta k_{Sav} = \frac{15 D_p (1-\varepsilon)}{d^2} \quad \dots \quad (4)$$

D_p は細孔における有効拡散係数（細孔拡散係数ともいう）であり、吸着材中の拡散に寄与する有効な細孔の断面積割合と細孔の屈曲の度合いで決まる。このため、以下のような幾つかの計算モデルが提案されている⁽²⁰⁾。

(a) 並列細孔モデル

最も簡単な細孔モデルである並列細孔モデル（均一半径と長さを持つ多数の細孔が並列に配列して細孔群を形成している）では、

$$D_p = \frac{\varepsilon_p}{\xi^2} \left[\frac{1}{\frac{1}{D_{KA}} + \frac{1}{D_{AB}}} \right] \quad \dots \quad (5)$$

$$r = \frac{2\varepsilon_p}{S_g \rho_p} \quad \dots \quad (6)$$

ここで、 ε_p は粒子の空隙率（-）、 ξ^2 は細孔の屈曲係数（-）、 r は細孔平均半径（m）、 ρ_p は粒子の見かけ密度（kg・m⁻³）、 S_g は吸着材単位質量当たりの細孔表面積（m²・kg⁻¹）である。(5)式において、 ε の代わりに細孔率（断面積） ε_p を用いてもよい。 D_{KA} と D_{AB} は、それぞれ細孔内におけるクヌーセン拡散係数 D_{KA} (m²・s⁻¹)、分子拡散係数 (m²・s⁻¹) であり、以下の式で計算できる。

$$D_{KA} = \frac{2r}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_A}} \quad \dots \quad (7)$$

$$D_{AB} = \frac{6.7 \times 10^{-4} T^{1.83}}{P[(T_c/P_c)_A^{1/3} + (T_c/P_c)_B^{1/3}]^3} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \quad \dots \quad (8)$$

M_A と M_B は、それぞれ分子 A (ここでは、水蒸気)、分子 B (空気) の分子量 (kg・g-mol⁻¹)、P はガスの全圧 (atm)、T は温度 (K)、R は気体定数 (8.314J・g-mol⁻¹・K⁻¹) である。また、 T_c と P_c はそれぞれの分子の臨界温度 (水 : 647.3K、空気 : 132K)、臨界圧力 (水 : 218.4atm、空気 : 37.3atm) である。

(b) 2元細孔モデル

モレキュラーシーブのように2元細孔構造を持つ吸着材の場合には、ミクロ孔（添字 i で表す）とマクロ孔（添え字 a）の領域に分け、それぞれの平均細孔径と空隙率を用いると、(5)式は、

$$D_i = \frac{\varepsilon_i}{\xi^2} \left[\frac{1}{\frac{1}{D_{KA}} + \frac{1}{D_{AB}}} \right] + \frac{\varepsilon_a}{\xi^2} \left[\frac{1}{\frac{1}{D_{KA}} + \frac{1}{D_{AB}}} \right] \quad \dots \quad (9)$$

のように拡張できる。モレキュラーシーブ 5A については次のような値が報告されている。

屈曲係数 $\xi^2 = 3.4$

マクロ孔細孔率 $\varepsilon_a = 0.30 (-)$ 、マクロ孔平均半径 $r_a = 0.47 \mu\text{m}$

ミクロ孔細孔率 $\varepsilon_i = 0.26 (-)$ 、ミクロ孔平均半径 $r_i = 2.5 \mu\text{m}$

(c) ランダム細孔モデル

微細な粉末を成型して得られる触媒粒子では、粉末自身がミクロ細孔を有し、分体の間隙がマクロ細孔を形成する。このような場合について次のランダム細孔モデルが適用できる。

$$D_p = \frac{\varepsilon_i^2(1+3\varepsilon_a)}{1-\varepsilon_a} \left[\frac{1}{\frac{1}{D_{KA}} + \frac{1}{D_{AB}}} \right] + \varepsilon_a^2 \left[\frac{1}{\frac{1}{D_{KA}} + \frac{1}{D_{AB}}} \right] \quad \dots \quad (10)$$

この式は細孔の屈曲係数を含んでおらず、細孔構造のみから有効拡散係数を計算することができる。

(ii) 吸着帯長さZaの算出

充填層内で吸着帯が形成され、層内を一定速度を移動する場合、吸着帯長さZa (m)は次式で表される。

$$Za = \frac{u}{K_F a_v} N_{OF} \quad \dots \quad (11)$$

ここで、 N_{OF} は総括移動単位数（-）と呼ばれ、次式で計算される。

$$N_{OF} = \int_{C_B}^{C_0-C_B} \frac{dc}{C - C^*} \quad \dots \quad (12)$$

ここで、

C^* は吸着平衡濃度、 C_0 は入口水分濃度である（凝縮器出口温度 5 °Cにおける飽和水分濃度とすると、 $C_0 = 6.93 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ ）。

C_B は破過濃度であり、除染係数をDFとすると $C_B = C_0/DF$ 。

(12)式は、各種吸着材について求められている吸着等温線を用い、図積分により計算する。本設計検討では、図6.6に示すモレキュラーシープ5Aの吸着等温線を用いた。

乾燥塔入口と出口水分分圧が、それぞれ $1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$ 、 $1.33 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ （及び 1.33 Pa ）のとき、 N_{OF} と C_0/C_B との相関は次のようになる。

$$C_0/C_B = 10^3 \text{ のとき, } N_{OF} \approx 7.2$$

$$C_0/C_B = 10^2 \text{ のとき, } N_{OF} \approx 4.7$$

(iii) 破過時間t_B

破過時間 t_B は、近似的に次式で求められる。

$$t_B = \frac{q_0}{C_0} \frac{\gamma}{u} \left[Z - \frac{Za}{2} \right] \quad \dots \quad (13)$$

$$q_0 = q_0 - q_{res} \quad \dots \quad (14)$$

ここで、

q_0 は c_0 と平衡な吸着量 ($= 0.18 \text{ kg-H}_2\text{O/kg-MS5A}$) であり, q_{res} は、再生処理後（再生温度 350°C , 露点 15°C の再生ガスの露点 15°C ）の残留吸着量 q_{res} ($= 0.012 \text{ kg-H}_2\text{O/kg-MS5A}$) である。

Z は充填層高 (m), γ は充填密度 ($= 720 \text{ kg-MS5A/m}^3$) である。

(iv) 所要吸着材量Wの算出

充填層直径を D_x (m) で表すと,

$$W = \frac{D_x^2 \pi}{4} Z \gamma \left[\frac{u C_0}{\gamma q_0} t_B + \frac{Z a}{2} \right] \quad (15)$$

図6.7は、以上の各式を用いて概略計算した通常時用TCS系乾燥塔の充填層高 Z とガス流速 u 及び運転時間との相関関係である。乾燥塔の再生操作性の観点から現実的な層高 5 m 以下とするためには、運転時間は 1 日以下、ガス流速は 1 m/s 以下としなければならないことが分かる。塔直径は 2 ~ 4 m となる。本計算の主要パラメータを以下に示す。

$$Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{s} (25^\circ\text{C}, 1.2 \text{ atm}) ,$$

$$c_0 / c_B = 10^3 ,$$

$$c_0 = 6.93 \times 10^{-3} \text{ kg-H}_2\text{O/m}^3 ,$$

$$q_0 = 0.168 \text{ kg-H}_2\text{O/kg-MS5A} ,$$

$$N_{or} = 7 , K_{Fav} = 5.3 ,$$

$$\gamma = 720 \text{ kg-MS5A/m}^3 .$$

一方、大容量の乾燥塔の再生操作 (350°C での加熱と室温への冷却) は長時間を要するので、再生周期はできるかぎり長く (例えば 1 ヶ月単位) となるのが普通である。しかし、図から分かるように $u = 0.4 \text{ m/s}$, 2 週間で必要層高は約 30 m であり現実的ではない。室内空気処理用のTCS系では、乾燥塔の入口水分濃度を大幅に低減する何らかの前処理プロセスが必要であろう (例えば $0.1 c_0 = 6.93 \times 10^{-4} \text{ kg-H}_2\text{O/m}^3$ とすると $Z = 6 \text{ m}$ で約 1 ヶ月の運転が可能となる)。

(v) TCS系乾燥塔の計算結果

通常時用、分解修理時用及び事故時用TCS系における乾燥塔の設計計算結果 (ただし、再生周期を 0.5 日とした) を表6.5 - 表6.7 にまとめた。

表6.1 通常時用TCSの所要風量と運転時間

第1段TCS処理 風量 (m ³ /h)	換気回数 (h ⁻¹)	所要運転時間 (h)	スタックから の排出量 (Ci)
500	0.0049	1206	22.00
1000	0.0098	1307	11.06
2000	0.0200	655	5.54
3000	0.0293	437	3.70
4000	0.0391	328	2.77
5000	0.0489	262	2.22
6000	0.0587	219	1.85
7000	0.0686	188	1.59
8000	0.0782	164	1.39
9000	0.0880	146	1.23
10000	0.0978	131	1.11
12500	0.1221	105	0.89

表6.2 雰囲気トリチウム浄化設備(通常時用、分解修理時用TCS)からの
トリチウム廃液発生量

ゾーン区分	TCS処理対象室	室容積 m ³	室給気量 m ³ /h	トリチウム発生量 Ci/d	トリチウム廃液発生量 kg/d	廃液トリチウム濃度 Ci/m ³	階層
	炉本体室	102200	430	0.6	207	2.9	1F
	NBIイオン源室1,2	101130	8450	0.6 (*1)	3483	0.17	B1F-B2F
	NBI付属設備室1,10						
	NBIエンタансス						
	NBIビームダンプ室	4800	400	0.6	165	3.6	B2F
	一次冷却設備						
	バファータンク室	53200	4440	0.6	1830	0.32	B1F
	一次冷却設備						
レッド	熱交換器室	53200	4440	0.6	1830	0.32	B3F
	燃料系設備室	30700	2560	0.6	1055	0.57	B3F
	主排気ポンプ室	16300	70	0.6	34	18	B3F
	分権通路	2560	220	0.6	91*2	6.6*2	B1F, 2F
	分権通路	2560	220	0.6	91*2	6.6*2	
アンバー	一次冷却設備主ヘッダ室	16300	1630	0.6	561	1.1	B1F

廃液合計 14886 kg/d

*1 各室の合計値

*2 分解修理時

表6.3 換気空調設備(HVAC系)からの放射性固体廃棄物の発生量

設備系統	廃棄物名称	時期	頻度 (回/年)	発生量 (kg/年)	寸法、数量
レッドゾーン	プレフィルタ	定検時	1	1 2 0	61 x 5 x 61(cm) x 40枚
	HEPAフィルタ		1	5 6 0	61 x 29 x 61(cm) x 40枚
アンバーノーン	プレフィルタ		1	1 0 8	61 x 5 x 61(cm) x 36枚
	HEPAフィルタ		1	5 0 4	61 x 29 x 61(cm) x 36枚

表6.4 雰囲気トリチウム浄化設備(TCS系)からの放射性固体廃棄物の発生量

設備系統	廃棄物名称	時期	頻度 (回/年)	発生量/回 (kg/回)	発生量/年 (kg/年)	寸法、数量	備考
通常時用	吸着材	定検時	1	40.8x10 ³	40.8x10 ³	-	3系統分
	酸化触媒		1	7.7x103	7.7x103	-	3系統分
	HEPAフィルタ		1	324	0.6m ^d x0.8m ^h x12枚	3系統分, 27kg/枚	
分解修理時用	吸着材	未定	18.4x103	-	-	-	
	酸化触媒		3680	未定	0.6m ^d x0.8m ^h x2枚	27kg/枚	
	HEPAフィルタ		54	-	-	-	
事故時用 (TCS-1)	吸着材	未定	5600	-	-	-	
	酸化触媒		1104	未定	0.6m ^d x0.5m ^h x1枚	18kg/枚	
	HEPAフィルタ		18	-	-	-	
事故時用 (TCS-2)	吸着材	未定	1200	-	-	-	
	酸化触媒		184	未定	0.45m ^d x0.5m ^h x1枚	8.5kg/枚	
	HEPAフィルタ		8.5	-	-	-	

表6.5 乾燥塔設計パラメータ(1)：粒子内拡散抵抗の算出

項目	記号	単位	値
水蒸気分子量	M_A	—	18
水蒸気臨界圧	P_{C1}	atm	218.4
水蒸気温度	T_{C1}	K	647.3
空気分子量	M_B	—	29
空気臨界圧力	P_{C2}	atm	37.3
空気温度	T_{C2}	K	132
気体定数	R	J · g · mol ⁻¹ · K ⁻¹	8.314
乾燥塔内平均ガス温度	T	K	293
乾燥塔内平均ガス圧力	P	atm	1.2
クヌーセン拡散係数	D_{KA}	m ² / s	1.84 × 10 ⁻⁴
気相相互拡散係数	D_{AB}	m ² / s	0.211 × 10 ⁻⁴
総括拡散係数	D_o	m ² / s	0.189 × 10 ⁻⁴
細孔内有効拡散係数	D_p	m ² / s	0.0167 × 10 ⁻⁴
MS5Aの細孔屈曲率	ξ^2	—	3.4
MS5Aのマクロ孔細孔率	ϵ_p	—	0.30
MS5Aの空隙率	ϵ	—	0.36
MS5Aの粒子直径	d	m	3.2 × 10 ⁻³
粒子内拡散抵抗	$\beta k_s a_v$	s ⁻¹	5.42

表6.6 乾燥塔設計計算パラメータ(2)：充填層破過帶長さの算出

項目	記号	単位	通常時 TCS	分解修理 TCS	事故時 TCS-1	事故時 TCS-2
乾燥塔内ガス温度	T	K	293	→	→	→
乾燥塔内ガス圧力	P	atm	1.2	→	→	→
処理風量	Q	m ³ / h	10800	5100	1500	250
塔内体積流量	Q_0	m ³ / s	2.5	1.18	0.35	0.058
空塔速度	u	m / s	0.39	→	→	→
塔直径	D_x	m	3.0	2.0	1.1	0.5
ガス密度	ρ	kg / m ³	1.43	→	→	→
ガス粘性係数	μ	kg/m · s	1.82 × 10 ⁻⁵	→	→	→
レイノルズ数	Re	—	98	→	→	→
MS5A粒子直径	d	m	3.2 × 10 ⁻³	→	→	→
MS5A粒子比表面積	a_v	m ² / m ³	1600	→	→	→
充填層空隙率	ϵ	—	0.36	→	→	→
境膜拡散抵抗	$k_s a_v$	s ⁻¹	169	→	→	→
流内拡散抵抗	$\beta k_F a_v$	s ⁻¹	5.4	→	→	→
総括物質移動係数	$K_F a_v$	s ⁻¹	5.3	→	→	→
総括移動単位数	N_{OF}		4.0	→	→	→
破過帶長さ	Za		0.30	→	→	→

表6.7 乾燥塔設計計算パラメータ(3)：充填層高、充填量の算出

項目	記号	単位	値
入口水分濃度(5°C飽和)	c_o	$\text{kg-H}_2\text{O}/\text{m}^3$	6.93×10^{-3}
入口水分分圧(5°C飽和)	$P_{\text{H}_2\text{O}}$	mmHg	6.55
平衡吸着量(25°C)	q_o	$\text{kg-H}_2\text{O}/\text{kg-MS5A}$	0.18
残留吸着量 ¹	$q_{r,s}$	$\text{kg-H}_2\text{O}/\text{kg-MS5A}$	0.02
設計吸着量	q_o'	$\text{kg-H}_2\text{O}/\text{kg-MS5A}$	0.16
平衡吸着係数(q_o/c_o)	β_o	$\text{m}^3/\text{kg-MS5A}$	23.09
MS5A充填密度	γ	$\text{kg-MS5A}/\text{m}^3$	720
運転時間	t_B	s	4.32×10^4
空塔速度	u	m/s	0.35
破過帶長さ	Z_a	m	0.27
充填層高	Z	m	1.16
MS5A充填量(通常時用)	W	kg-MS5A	10179 ²
MS5A充填量(分解修理時用)	W	kg-MS5A	4524 ²
MS5A充填量(事故時用-1)	W	kg-MS5A	1369 ²
MS5A充填量(事故時用-2)	W	kg-MS5A	283 ²

*1 再生温度350°C、再生ガスの露点15°C

*2 設計裕度を約100%として層高を2mとした場合。

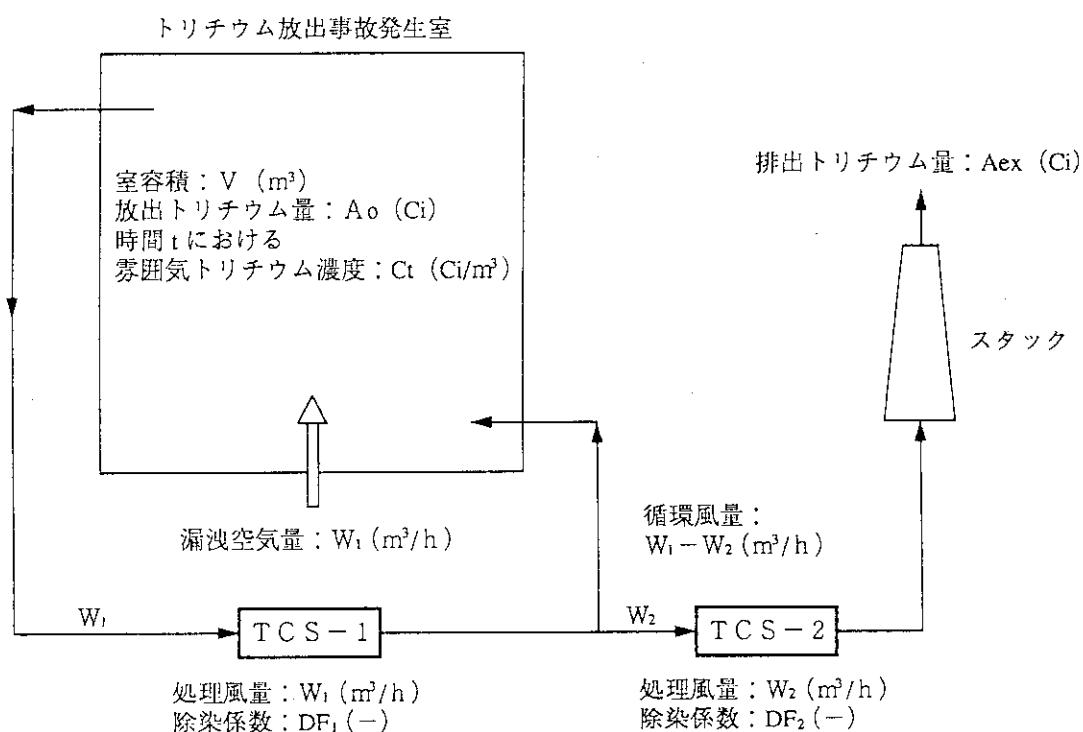


図6.1 大量トリチウム放出事故時の雰囲気トリチウム浄化設備運転モード

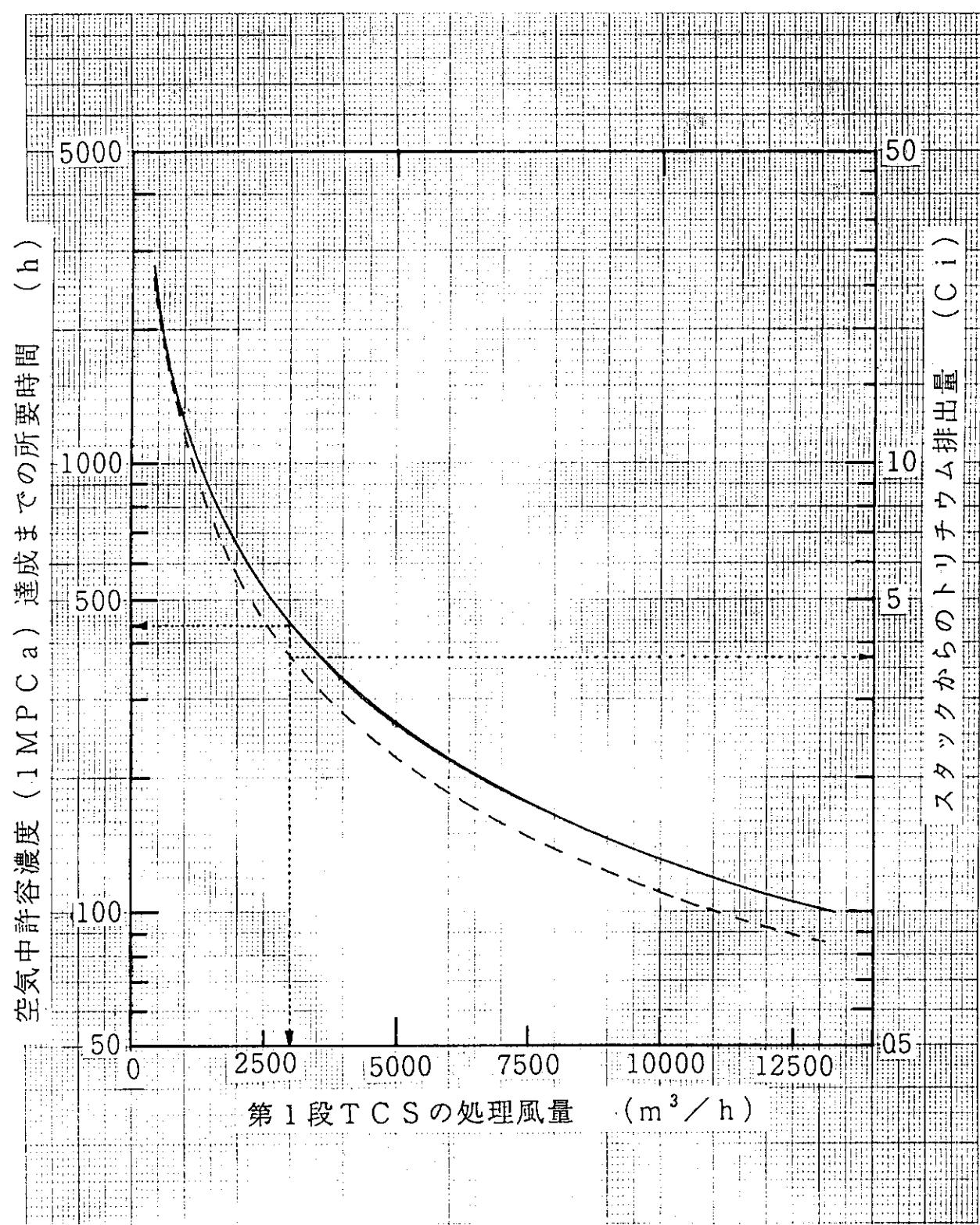


図6.2 事故時用TCSの所要風量と運転時間

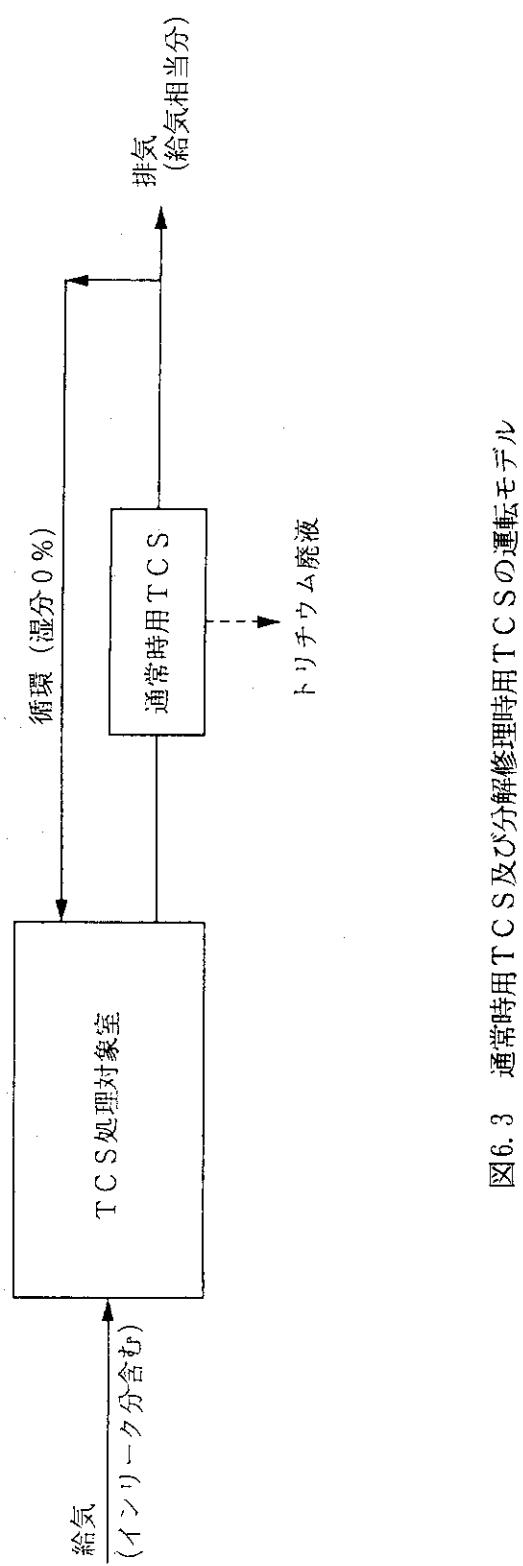


図6.3 通常時用TCS及び分解修理時用TCSの運転モデル

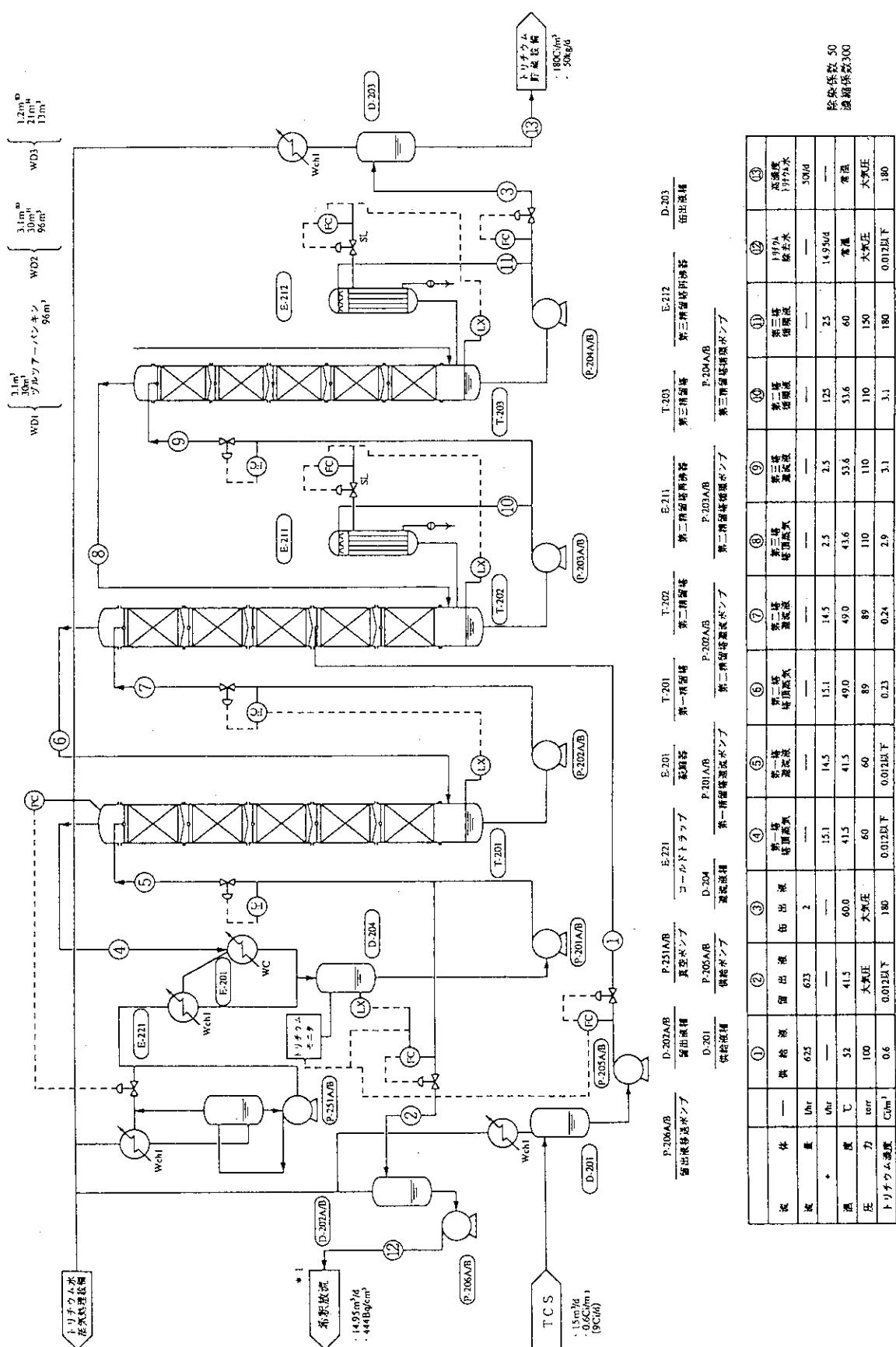
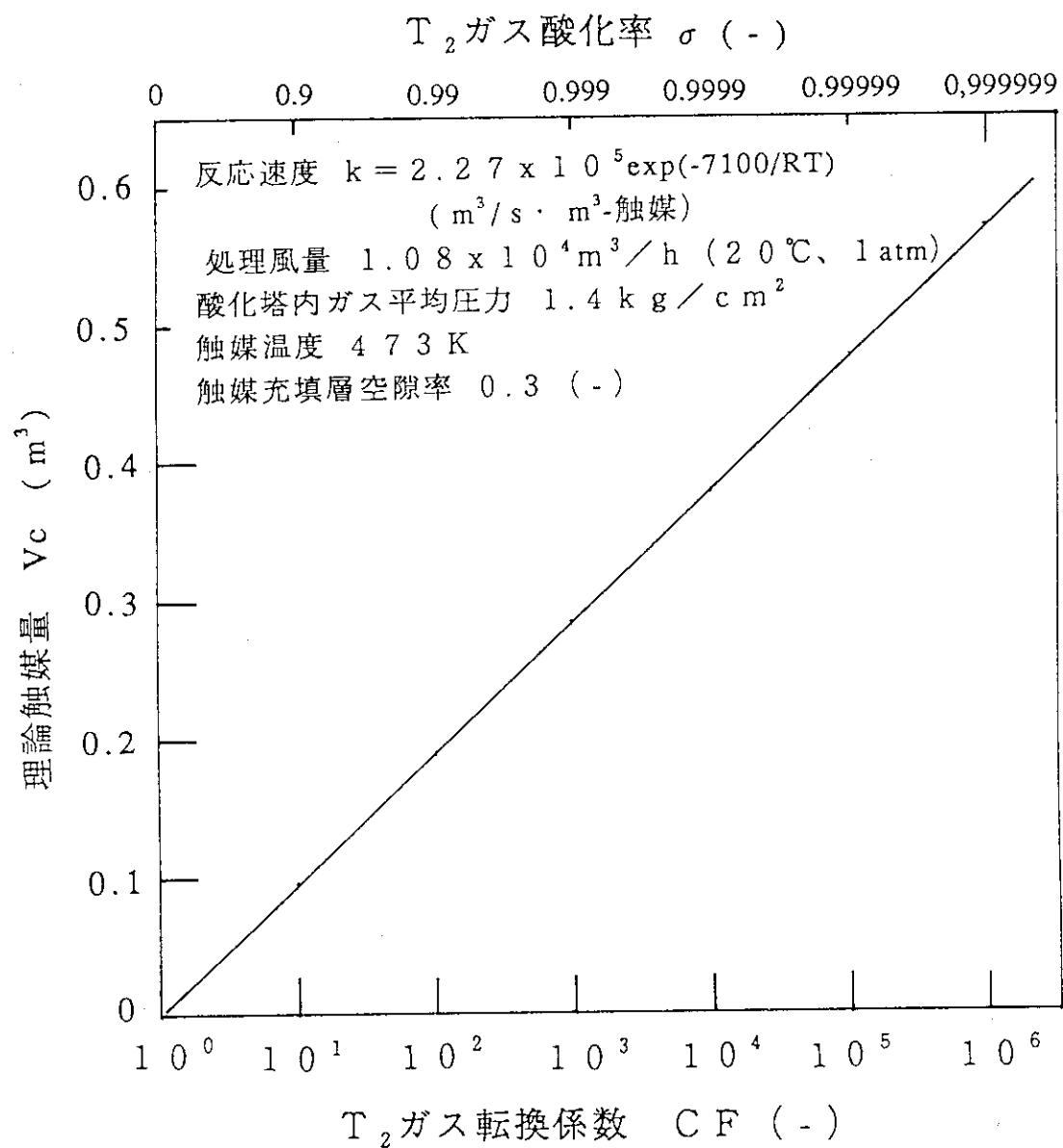
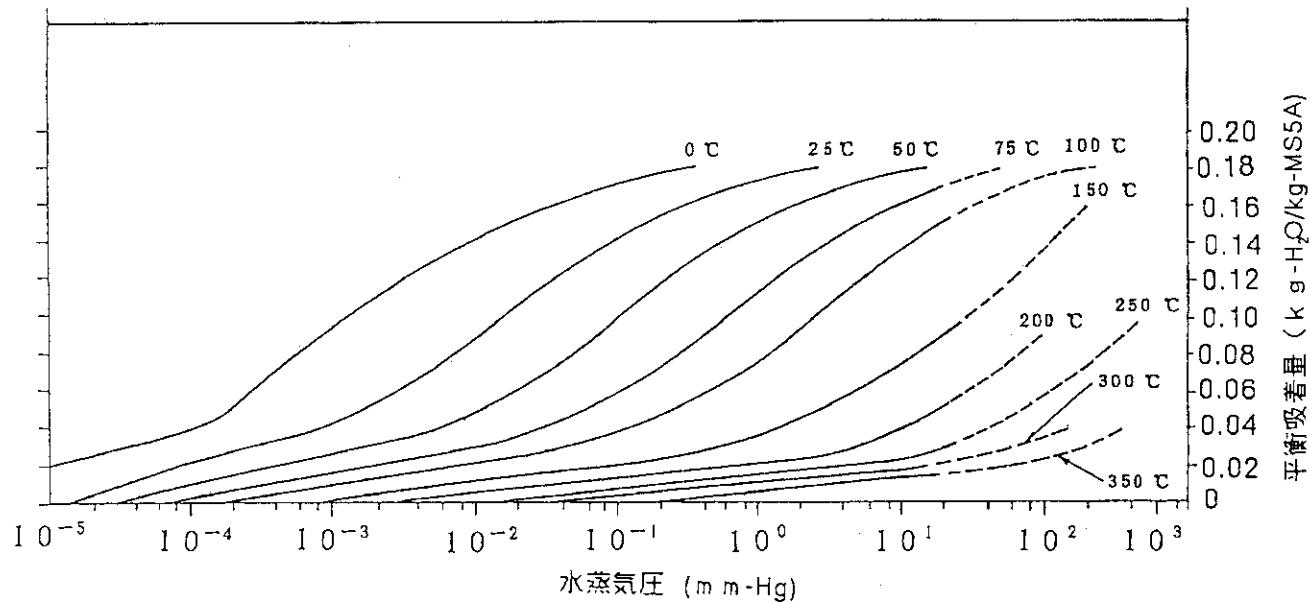
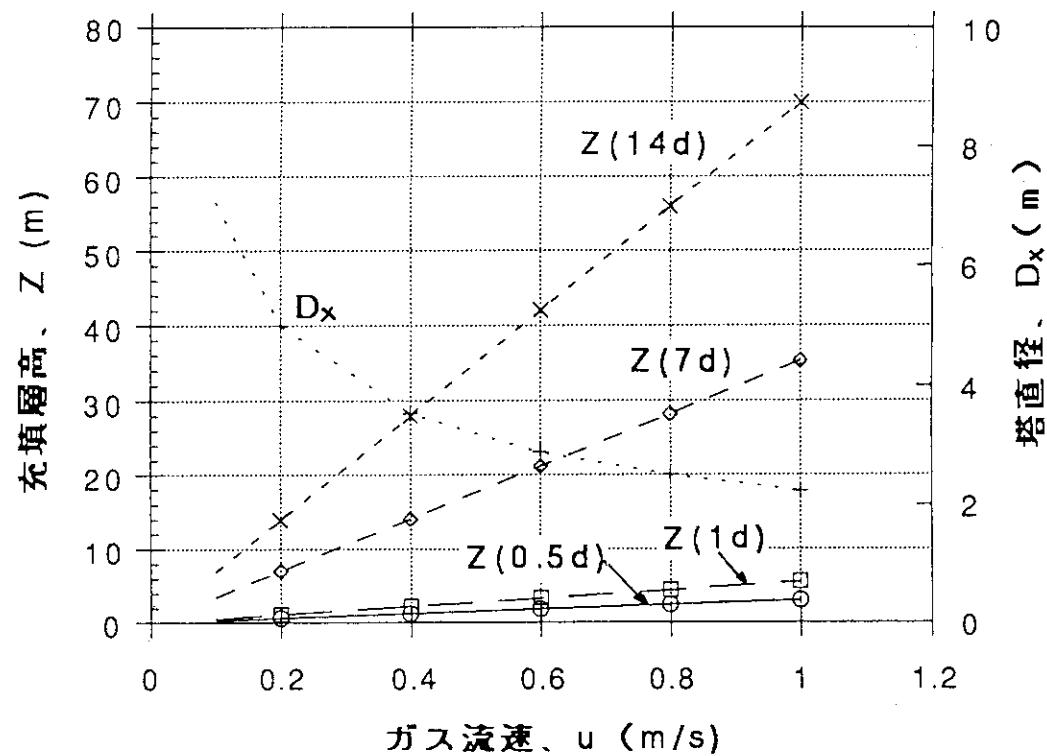


図6.4 核融合実験路 (FER) 建家トリチウム安全系からの廃液の濃縮減容設備の規模

図6.5 酸化塔のT₂ガス酸化性能と所要触媒量の相関

図6.6 モレキュラーシーブ5AのH₂Oに対する吸着等温線図6.7 処理風量10800m³/hのTCS系用乾燥塔の設計パラメータスタディ

7. ま と め

I T E R, F E R 等の核融合実験炉における主排気設備, 燃料供給設備, N B I 関連設備, 一次冷却水ヘッダー等の炉周辺設備室は, 部屋そのものがトリチウム閉込め隔壁(第2次格納系)としての機能を備える必要がある。これらの設備室は, 実験炉運転のすべての状況(通常運転時, 炉内機器分解修理時, 事故時)において作業者の被曝を防護し, かつ環境へ放出されるトリチウムを低減化するための安全設備(室内雰囲気トリチウム浄化設備)が不可欠となる。本設計検討では, 炉建家を管理区域(通常時及び分解修理時, 及び事故時にトリチウムが発生する可能性がある区域)と非管理区域(トリチウム発生の恐れがまったくない区域)にゾーン区分し, 前者については室内雰囲気トリチウム浄化設備(通常時用, 分解修理時用, 事故時用の3系統), 後者については換気空調設備の設計検討を行なった。以下は, 今後の設計において考慮すべき主要課題である。

(1) 室内雰囲気トリチウム浄化設備について

(i) 雰囲気別トリチウム浄化設備

真空破断事故時の火災防止, 中性子による空気の放射化防止, 水素防爆等の観点から, 炉周辺設備室の幾つかは不活性ガス雰囲気を用いことが考えられる。この場合には, 空気, チッソガス, ヘリウムガス等の雰囲気別のトリチウム浄化設備設計が必要となる。

(ii) 運転時間／機器設計

雰囲気トリチウム浄化設備を構成するトリチウム水乾燥塔の大きさ, 並列基数, 及び運転時間(吸着／再生時間)は, 雰囲気中の水分に対する吸着容量設計により大きく異なる。対象室の容積, 気密度, 処理風量, 再生頻度を考慮した合理的な設計が必要である。

(iii) トリチウム除染係数

雰囲気トリチウムの除去効率及び環境への排出トリチウム量は, 触媒酸化塔性能(酸化効率)と乾燥塔のトリチウム水吸着効率により定まる除染係数(DF)に依存するが, 水蒸気スワンピング等によりDFを大幅に高めることも可能である(ただし, トリチウム廃液量が増加する)。トリチウム放出事故等の事象に対応する合理的な除染係数を明らかにし, 設計及び運転方法に反映する必要がある。

(2) 炉建家設計について

(i) 部屋の気密度向上

雰囲気トリチウム浄化設備による雰囲気処理が必要なレベルのトリチウム発生の可能性がある設備室については, できるだけ気密度を高める必要がある。とくに, 容積の大きい部屋については, 10vol%/d程度とすることが望ましい(一部10vol%/d, 大部分の室に対して200vol%/dとした本検討では, トリチウム廃液発生量が15m³/dとなり, 大規模な廃液濃縮・減容設備が不可欠である)。

(ii) ゾーンの区分の見直し(遮蔽設計区分, 濃度限度区分)

本検討では、国内法規に基づく空気中のトリチウム水濃度区分による建家ゾーニングを行なった。すなわち、放射線業務従事者が常時立ち入ることのできる場所として管理区域を設定し、雰囲気トリチウム浄化設備は該当区域の空気中トリチウム水濃度を 1 MPCa ($1.85 \times 10^{-1} \text{ Bq}/\text{m}^3$)、管理区域に係わる現在の規制値 = $2.1 \times 10^{-1} \text{ Bq}/\text{cm}^3$) 以下を維持できるものとした。今後遮蔽設計において建家内の空間線量率が明らかになった段階で、トリチウムによる内部被曝と放射線による外部被曝との複合を考慮したゾーン区分及び空気中トリチウム水濃度限度を定める必要がある。

(iii) 管理区域の立ち入り制限

本検討では、特別に防護具等を着用しないで人が管理区域内に立ち入ることができることを前提としたトリチウム安全系設計を行なった。しかし、炉周辺設備の多くは放射化され、厳重な立ち入り制限が行なわれると想定されることから、十分な防護具着用と立ち入り時間制限を前提としたトリチウムの空気中濃度を検討する必要がある。

(3) トリチウム漏洩量の評価と低減化対策の必要性

本検討では、常時トリチウムの発生がある設備及び分解修理時にトリチウムの発生がある設備を適宜選択し、発生量はそれぞれ一律に 0.60 Ci/d とした。炉周辺設備の今後の設計において、それぞれのトリチウム漏洩量の正確な評価が必要であり、より大きな漏洩が予想される機器に対しては適切な漏洩低減化設計を行なうべきである。とくに、DT燃料アイスペレット入射設備、NBI排気パネル再生設備、主排気ポンプ／フォアポンプ設備、一次冷却水ポンプ設備等が主要なトリチウム発生源となる可能性が高いと予想される。分解修理時のトリチウム発生量についても今後の設計によるところが多い。

(4) 大量トリチウム放出事故時のトリチウム挙動

本検討では、次のように極めて単純化した事故事象とトリチウム挙動に基づく雰囲気トリチウム浄化設備の設計と運転時間の検討を行なった。

- T_2 ガスのみが放出し、
- 室内自由空間で瞬時に完全混合し、
- 净化設備の運転と共に均一濃度減衰する。

今後の検討では、事故発生の想定されるそれぞれの設備室の幾何学的条件、空気又はその他の雰囲気ガスの室内における種々の流れの条件、建家壁や器壁との相互作用（吸着／脱着、同位体交換反応）を考慮したトリチウム挙動を明らかにする必要がある。また、净化設備の性能に大きな影響を与える大量水蒸気や炭化水素ガスが共存する場合の検討も不可欠である。

参 考 文 献

1. ITER Fuel Cycle, ITER Documentation Series, No.31, IAEA, Vienna, 1991.
2. ITER Safety, ITER Documentation Series, No.36, IAEA, Vienna, 1991.
3. ITER Plant Systems, ITER Documentation Series, No.35, IAEA, Vienna, 1991.
4. 原子力規制関連法令集, 1992年版, 科学技術庁原子力安全局, (株)大成出版社(1992)
5. 再処理施設安全審査指針, 原子力安全委員会, 昭61年2月
6. 六ヶ所事業所再処理事業指定申請書,
7. 六ヶ所事業所再処理事業指定申請書, 添付書類七
8. 六ヶ所事業所再処理事業指定申請書, 添付書類六
9. 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針, 原子力委員会, 昭52年6月
10. 原子力工業, 1987年2月号, 日刊工業新聞社,
11. 実用発電用原子炉の設置, 運転等に関する規則の規定に基づく線量当量限度を定める告示, 通産省告示第131号(平成元年)
12. 大量トリチウム取扱施設安全審査専門家検討会報告書, 科学技術庁原子力安全局, 昭60年8月
13. 原研東海研究所原子炉施設保安規定(別表第13抜粋),
14. 東京電力株式会社 柏崎・刈羽原子力発電所の原子炉の設置について:
原子力安全委員会月報, Vol. 22, No. 8, 1977
15. 日本原子力発電(株) 敦賀発電所の原子炉の設置変更(2号炉の増設)について:
原子力安全委員会月報, 1981年10月号
16. 関西電力(株) 大飯発電所の原子炉の設置変更(3, 4号炉の増設)について:
原子力安全委員会月報, 1987年1月号
17. 高放射性物質取扱い施設とロボット:日本原子力学会, 1983年11月, P221, P243, P265。
18. 建築設備設計要領, (財)全国建設研修センター, 昭61年8月
19. 発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針について:
原子力委員会, 昭51年
20. 化学工学便覧, 改訂五版, 化学工学協会, 丸善(株), 昭63年
21. 触媒装置及びその設計, 触媒工学講座3, 触媒学会, 他人書館, 昭51年
22. 触媒反応装置とその設計, 触媒工学講座6, 触媒学会, 講談社, 1986年
23. 木下ら: トリチウム除去システムにおける触媒酸化反応器の設計法に関する検討,
JAERI-M8612(1979)
24. 木下ら: トリチウム除去システムにおけるトリチウム水吸着塔の設計法に関する検討,
JAERI-M8648(1980)
25. J.C. Bixel and C.J. Kershner; A Study of Oxidation and Adsorption for the Removal

of Tritium from Air, WASH-1332(1974)

26. 吉田ら：水素およびメタンによるトリチウム除去システムの模擬実験,
日本原子力学会誌, Vol. 23, No. 12, (1981)49